INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Mayo 2011 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

PLANETAS
Viaje a Mercurio

DINOSAURIOS
Atrapados en el desierto de Gobi

FÍSICA
Un demonio de Maxwell en el laboratorio

CÉLULAS MADRE
Nuevos usos médicos

Floración

¿Cómo saben las plantas cuál es el mejor momento para florecer?

FLORACIÓN | CÉLULAS MADRE | VIAJE A MERCURIO | CAMBIO CLIMÁTICO

N.º 416

MAYO 2011



6,00 EUROS



42

ARTÍCULOS

PSICOLOGÍA

14 Claves de la resiliencia

Cuando la tragedia nos golpea, la mayoría de nosotros nos sobreponemos de manera admirable. ¿De dónde procede tal capacidad? *Por Gary Stix*

GENÉTICA

20 Evolución de la cromatina

A pesar de la gran información que poseemos del cromosoma, queda mucho por conocer sobre su función y evolución. *Por Gregory A. Babbitt*

BIOLOGÍA VEGETAL

28 Bases moleculares de la floración

Estudios recientes desvelan una red de señales moleculares que optimiza el tiempo de floración. *Por M. Á. Blázquez, M. Piñeiro y F. Valverde*

FÍSICA

42 Demonios, entropía y la búsqueda del cero absoluto

Un experimento imaginario del siglo xix se ha convertido en un procedimiento factible para alcanzar temperaturas extremadamente bajas. *Por Mark G. Raizen*

ASTROFÍSICA

50 Viaje al planeta más cercano al Sol

En marzo, una sonda entró en órbita alrededor de Mercurio por vez primera. *Por S. L. Murchie, R. J. Vervack, Jr. y B. J. Anderson*

MEDICINA

56 Enfermedades en una placa de Petri

Las células madre procedentes de tejidos adultos podrían impulsar el desarrollo de fármacos para combatir enfermedades debilitantes. *Por Stephen S. Hall*

PALEONTOLOGÍA

62 Trampa mortal

Los fósiles hallados en una fosa del desierto de Gobi arrojan luz sobre la vida de los dinosaurios. *Por Paul C. Sereno*

TÉCNICAS OBSERVACIONALES

68 Astronomía en globo, ayer y hoy

Ya en 1874, dos investigadores se elevaron a una altitud de casi 8000 metros para efectuar observaciones astronómicas desde un globo aerostático. Desde entonces, los telescopios a bordo de globos han permitido explorar el cielo en casi todas las regiones del espectro. *Por Dietrich Lemke*

ROBÓTICA

78 Escarabajos *cyborg*

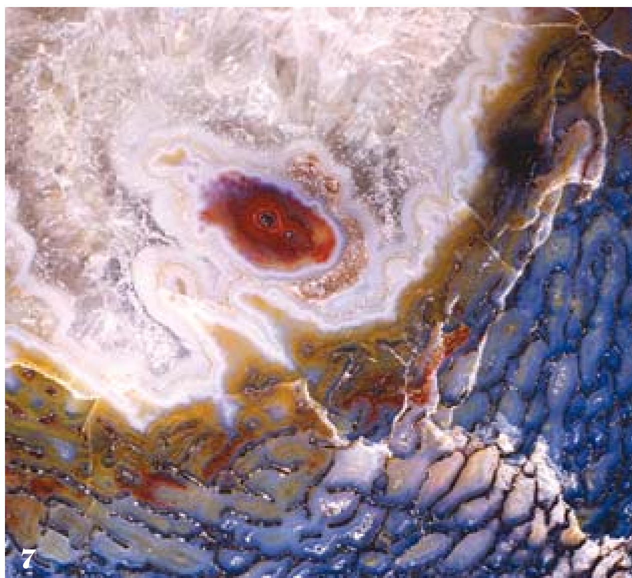
Diminutos robots voladores, parte insecto y parte máquina, ayudarán algún día a salvar vidas en caso de guerra o catástrofe. *Por M. M. Maharbiz y H. Sato*

CLIMATOLOGÍA

84 Cambios en el cinturón de lluvias

La reconstrucción histórica de las precipitaciones ecuatoriales ha permitido predecir la evolución del tiempo en los trópicos hasta 2100. *Por J. P. Sachs y C. L. Myhrvold*

ADAM VOORHES


7


38


90

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes
El origen de las baterías. Un arco de acero para Chernóbil. El efecto Coriolis. La mente más pequeña. Bisontes contra mamuts. Preparados para el gran terremoto. ¿Arte o ciencia?

6 Agenda

8 Panorama
Radiaciones ionizantes. *Por Guillem Cortés Rossell*
Envejecimiento prematuro. *Por Matilde Murga*
Monotremas extremos. *Por Charles Q. Choi*
¿Máquina o humano? *Por Raúl Arrabales Moreno*

37 Foro científico
Playas agotadas. *Por José A. Jiménez*

38 De cerca
Conservación de la herpetofauna. *Por C. A. Gallego Carmona, J. Llano Mejía y M. J. Gómez Martínez*

40 Filosofía de la ciencia
Ciencia y arte: ¿vidas paralelas? *Por José Carlos Pinto de Oliveira*

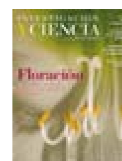
90 Taller y laboratorio
Miscelánea electroquímica. *Por Marc Boada*

93 Libros
Los límites de la física. *Por Ángel Garcimartín*

94 Juegos matemáticos
Ilusionismo matemático. *Por Gabriel Uzquiano*

96 Hace...
50, 100 y 150 años.

EN PORTADA



Las plantas perciben cambios en su entorno y señales internas que les inducen a florecer. Como respuesta a la temperatura ambiental y a la duración del día, así como al estado nutricional y hormonal de la planta, se produce una imbricada cascada de reacciones moleculares que ponen en marcha el desarrollo de la flor. Fotografía de A. Kniesel/Creative Commons 3.0 Unported (*flor de* Hippeastrum).

redaccion@investigacionyciencia.es



Enero 2011

HUMANOS Y PARÁSITOS

En el artículo de Mary Carmichael «Detener al parásito más letal del mundo» [Investigación y Ciencia, enero de 2011], encuentro interesante la idea de inmunizar los mosquitos a través de portadores humanos, quienes transferirían la vacuna al insecto. Pero ¿no podrían utilizarse, en lugar de personas, otros mamíferos? De esta manera se evitaría el dilema ético de vacunar a individuos que no se benefician directamente de ello.

Paul Sidhu
Smethwick, Reino Unido

Responde Carmichael: *Vacunar a los animales es una idea atractiva, la cual reviste claramente una mayor aplicabilidad en el caso de enfermedades transmitidas por vectores con reservorios no humanos (por ejemplo, vacunar a los perros para prevenir la transmisión, tanto canina como humana, de la leishmaniasis visceral). Con todo, las dos principales especies de parásitos de la malaria humana* —Plasmodium falciparum *y* P. vivax— *no cuentan con muchas posibilidades a la hora de hospedarse en otros vertebrados. Por otra parte, como ya se señalaba en una de las conclusiones del artículo, una campaña de vacunación que bloquease la transmisión de la malaria sí beneficiaría de manera directa al individuo. El beneficio no sería inmediato, pero aparecería más tarde. No obstante, nadie considera limitar las medidas al uso de vacunas de bloqueo de la transmisión de la enfermedad. Lo más probable sería que una vacuna de ese tipo se combinase con otras y con fármacos antipalúdicos.*

NÚMEROS TRASCENDENTES

En el artículo de la sección *Juegos matemáticos* de marzo de 2011 [«Los límites del conocimiento»] el profesor Uzquiano dejó de comentar algo que quizás hubiera interesado a los lectores.

Se trata de averiguar si existen números irracionales a y b tales que a^b es racional. O bien $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es racional, o bien lo es $(\sqrt{2}^{\sqrt{2}})^{\sqrt{2}}$. Pero, como precisamente señala el autor, el razonamiento no nos permite saber cuál de los dos es racional. Sin embargo, existe un argumento que nos da la respuesta: $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es un número trascendente y, por tanto, irracional.

Un número es trascendente si y solo si no es algebraico. Decir que z es algebraico significa que existe un polinomio con coeficientes enteros que tiene a z como raíz (por supuesto, se excluye el polinomio cero). Según el teorema de Gelfond-Schneider, si a y b son números algebraicos distintos de 0 y 1, y b no es racional, entonces a^b es trascendente. El teorema resolvió uno de los famosos problemas de Hilbert (puesto que no es necesario que a ni b sean reales).

Gracias a los autores de esta columna, que siempre es interesante.

Stephen Turner
Badajoz

Responde Uzquiano: *En efecto, aunque el objeto del argumento de que hay números irracionales* a *y* b *tales que* a^b *es racional era ilustrar la noción de prueba no constructiva, lo cierto es que sabemos que* $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ *es irracional, ya que se trata de la raíz cuadrada de* $2^{\sqrt{2}}$, *cuya trascendencia fue demostrada por Kuzmin en 1930. Este resultado era una respuesta parcial al séptimo problema de Hilbert, que consistía en demostrar la irracionalidad y trascendencia de ciertos números, como* $2^{\sqrt{2}}$ *o* e^{π}. *En 1934, Gelfond y Schneider contribuyeron de manera independiente a dar una solución general, de la que se sigue también que ambos números son trascendentes. Curiosamente, Hilbert había vaticinado que el problema sería tan difícil de resolver como el estatus de la hipótesis de Riemann o el último teorema de Fermat.*

LA BIBLIA Y LOS REGISTROS HISTÓRICOS

Soy periodista y lector habitual de Investigación y Ciencia desde hace muchos años. El número de marzo de 2011 ha sido el primero en el que me parece que se ha incurrido en un error de bulto. En concreto, el artículo «Víctimas del cambio climático», por Alex de Sherbinin, Koko Warner y Charles Ehrhart, comienza afirmando: «Desde que existen registros históricos, las migraciones impuestas por el clima han remodelado a la civilización». Hasta ahí, ningún problema. El dislate viene después, cuando se habla de la sequía que «obligó a Jacob y su prole a abandonar Canaán». ¿Quiere esto decir que en Investigación y Ciencia se considera la Biblia como un registro histórico, o al menos que los autores lo consideran así? Pediría, sinceramente, que la mitología y las creencias de cada uno se dejen a un lado cuando hablemos de ciencia.

Jaime Fernández Garrido
Madrid

Responden los autores: *Nuestro propósito no era argumentar ni a favor ni en contra de la veracidad de la Biblia como fuente histórica, si bien la existencia de muchos de los acontecimientos y personajes del Antiguo Testamento ha sido corroborada mediante pruebas arqueológicas y otros documentos. Más bien, decidimos ilustrar el fenómeno de las migraciones inducidas por el clima con un acontecimiento conocido y que pudiese atraer la atención de los lectores.*



Marzo 2011

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, Pral. 1ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

HISTORIA DE LA CIENCIA

El origen de las baterías

La energía de una batería procede de la tendencia de las cargas eléctricas a pasar de una sustancia a otra cuando se dan ciertas condiciones. Esa era la energía que Alessandro Volta pretendía aprovechar cuando, a finales de 1799, construyó la primera pila.

Una batería cuenta con dos electrodos. Uno de ellos (ánodo) tiende a ceder electrones al otro (cátodo). Por ello, al conectarlos a través de un circuito, los electrones fluyen y realizan trabajo (por ejemplo, encender una lámpara). Pero el simple movimiento de los electrones de un lugar a otro no da mucho de sí. Dado que las cargas del mismo signo se repelen, los electrones que se van acumulando en el cátodo acaban, a la postre, por impedir la llegada de más electrones. Para lograr una corriente estable, la batería ha de redistribuir las cargas en su interior. Ello se consigue transportando desde el ánodo hacia el cátodo iones de carga positiva, tarea que realiza un electrolito. Este puede ser sólido, líquido o gelatinoso. En cualquier caso, si la batería funciona es gracias al electrolito interno.

Una batería de litio cuenta con un ánodo de grafito lleno de átomos de dicho elemento. Estos ceden electrones al circuito externo, por donde llegan al cátodo. Al haber perdido electrones, los átomos de litio se convierten en iones de carga positiva que ahora se sienten atraídos por la carga negativa acumulada en el cátodo, hacia donde fluyen a través del electrolito. Esa redistribución de iones compensa el desequilibrio de cargas y gracias a ella se mantiene la corriente eléctrica... hasta que se consume el litio del ánodo.

Al recargar la batería, el proceso se invierte: un voltaje aplicado entre los dos electrodos provoca que los electrones (y los iones) regresen al grafito. Este proceso cuesta energía, que es, en última instancia, la que almacenará la batería para realizar después trabajo útil.

Según Giuliano Pancaldi, historiador de la ciencia de la Universidad de Bolonia, Volta intentaba replicar el mecanismo que genera electricidad en la raya eléctrica, también conocida como pez torpedo. Es fácil que Volta se guiase por el método de ensayo y error antes de decidirse por electrodos de metal y cartón húmedo como electrolito, pues en aquella época nadie sabía de la existencia de átomos, iones o electrones. Pero, con independencia de la naturaleza de los portadores de carga, es muy probable que Volta nunca supiese que, en el interior de la batería, las cargas positivas se desplazaban en sentido contrario al «fluido eléctrico» del circuito externo. De hecho, como señala Pancaldi, habría de pasar un siglo para que se llegase a un acuerdo acerca del funcionamiento de la pila.

—Davide Castelvecchi



INGENIERÍA AMBIENTAL

Un arco de acero para Chernóbil

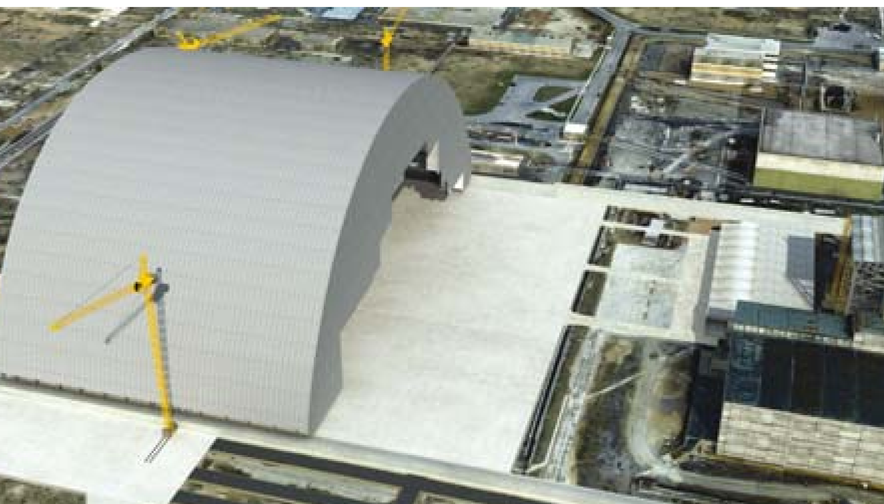
Imagine un gigantesco arco metálico más alto que la Estatua de la Libertad deslizándose a lo largo de una distancia de unos tres campos de fútbol. Bajo una construcción semejante, la mayor estructura móvil jamás construida, los ingenieros planean enterrar la central de Chernóbil, escenario del peor accidente nuclear de la historia.

Tras la explosión del reactor número 4, el 26 de abril de 1986, la Unión Soviética levantó un sarcófago de acero y hormigón con el fin de contener la radiactividad. «Fue un gran logro, pero, después de 25 años, corre peligro de derrumbarse», explica Eric Schmieman, ingeniero de caminos y ambiental del Instituto Battelle. La estructura, construida a toda velocidad para limitar la exposición de los trabajadores a la radiación, nunca fue concebida como una solución permanente. Schmieman explica que su diseño se asemeja al de un castillo de naipes, con piezas de metal enganchadas unas sobre otras. Carece de juntas soldadas o atornilladas, de manera que no haría falta un gran evento sísmico para derribarla.

Esa vieja estructura será reemplazada por el Nuevo Confinamiento Seguro (NSC), construido por la firma francesa Novarka y en cuyo diseño participó Schmieman. Dado que la radiactividad aún persiste en el reactor, por motivos de seguridad el NSC no se levantará sobre el sarcófago, sino en las inmediaciones, a partir de segmentos prefabricados. Después, se emplearán gatos hidráulicos para deslizar el arco a lo largo de unos 300 metros sobre cojinetes de teflón, hasta que cubra la construcción anterior. Una vez sellada, dos grúas robóticas activadas por control remoto y emplazadas en el interior del NSC desmantelarán el sarcófago y el reactor, y limpiarán los restos de polvo radiactivo que aún queden.

Novarka prevé concluir el NSC antes del verano de 2014. Su coste, de unos 1500 millones de euros, será financiado por 29 países. Se espera que la estructura contenga la radiación del reactor siniestrado durante al menos 100 años.

—Charles Q. Choi



CORBIS (*batería*); CORTESÍA DE NOVARKA (*arco de acero*)

FÍSICA

El efecto Coriolis

Hacia el final de la Primera Guerra Mundial, cuando el ejército alemán apuntaba con su artillería hacia París desde una distancia de 120 kilómetros, los soldados ajustaban la trayectoria en función de no pocos factores que bien podrían haber ignorado con cañones menos potentes. En particular, de no haber tenido en cuenta la sutil influencia de la rotación de la Tierra (el efecto Coriolis), los disparos se habrían desviado unos 800 metros.

Decenios antes, el parisino Gaspard Gustave Coriolis había deducido la ecuación que describe dicho efecto como parte de sus análisis sobre las máquinas giratorias, entre ellas los molinos de agua. El efecto Coriolis aparece siempre que intervenga la rotación de un sólido. Si nos hallamos sobre un tiovivo que gira en sentido antihorario y lanzamos una bola en cualquier dirección, veremos que su trayectoria se curva hacia la derecha. Un observador junto al tiovivo verá que la bola describe una línea recta, pero, en nuestro sistema de referencia rotatorio, la bola virará en sentido horario. Una nueva fuerza parece actuar sobre la bola. Debido a la rotación de nuestro planeta, los mismos efectos —aunque mucho más débiles— se observan sobre la superficie de la Tierra.

Además de desviar las trayectorias de los misiles balísticos, el efecto Coriolis da cuenta de que huracanes y tifones giren en sentido horario en el hemisferio sur y en sentido antihorario en el norte. De hecho, es dicho efecto lo que provoca que, en general, el viento fluya *alrededor* de las zonas de altas y bajas presiones, y no directamente desde las regiones de presión alta hacia las de presión baja. En el hemisferio norte, cuando el aire fluye en dirección radial, la rotación de la Tierra lo desvía hacia la derecha; en el hemisferio sur, ocurre lo contrario. El resultado es un régimen estacionario en el que el viento circunvala la zona de bajas presiones. El gradiente de presiones empuja hacia dentro; la fuerza de Coriolis, hacia fuera.



Un misil Titán II, con un alcance de más de 11.000 kilómetros, se vería desviado centenares de kilómetros a causa de la fuerza de Coriolis.

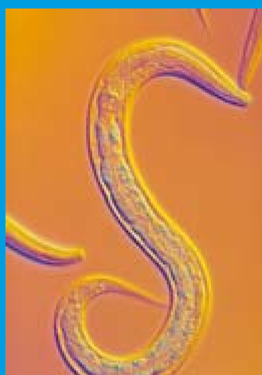
Una falsedad muy extendida afirma que, en un desagüe, el agua gira en un sentido en el hemisferio sur y en el sentido contrario en el hemisferio norte. Tal idea es un mito: aunque la fuerza de Coriolis posee la intensidad suficiente para dirigir la rotación de un huracán durante días, resulta demasiado débil como para inducir la rotación de una pequeña cantidad de agua durante los escasos segundos que tarda en desaparecer por el sumidero.

—Graham P. Collins

NEUROCIENCIA

La mente más pequeña

La ciencia ha dado un paso más hacia el control de la mente, aunque el tamaño de esa mente sea inferior al de un grano de arena. Andrew Leifer y sus colaboradores, de la Universidad de Harvard, han construido un sistema computerizado para manipular gusanos. Han conseguido así que se desplacen y se detengan, que sientan que algo les toca, e incluso les han incitado a poner huevos. Todo ello mediante la estimulación de sus neuronas con luz láser y mientras los gusanos nadan libremente en una placa de Petri. Esta técnica podría arrojar luz sobre el funcionamiento del sistema nervioso animal.



El gusano en cuestión es el nemátodo *Caenorhabditis elegans*, uno de los organismos más estudiados. Los investigadores han cartografiado y clasificado por completo sus células, incluidas sus 302 neuronas y las aproximadamente 5000 conexiones entre ellas. Sin embargo, no se conoce todavía el funcionamiento conjunto de las neuronas en una red. ¿Cómo coordina el gusano sus aproximadamente 100 músculos para relajarse y contraerse en forma ondulatoria cuando nada?

Para descubrirlo, se modificó genéticamente el pequeño nemátodo de un milímetro de longitud para que algunas de sus células se volvieran sensibles a la luz, una técnica desarrollada hace poco y conocida como optogenética [*véase* «Control del cerebro por medio de la luz», por Karl Deisseroth; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2011]. Puesto que el cuerpo del gusano es transparente, el uso de láseres enfocados en puntos concretos puede activar o desactivar distintas neuronas sin necesidad de electrodos u otros métodos invasivos. Leifer colocó un microscopio en un dispositivo construido para rastrear los movimientos del gusano mientras este nadaba en la placa. También desarrolló un *software* que analizaba las imágenes del microscopio, localizaba las neuronas de interés y finalmente apuntaba y disparaba el láser. La revista *Nature Methods* publicó los resultados en su página web.

Otros equipos han utilizado la optogenética para controlar neuronas individuales en gusanos inmovilizados. Leifer señala, sin embargo, que es necesario actuar sobre el gusano cuando este nada libremente. Ha demostrado así que, mientras el gusano avanza, las señales motrices se transmiten a lo largo del cuerpo a través de las células musculares, además de las conexiones nerviosas.

Leifer opina que la técnica podría ayudar a crear simulaciones completas del comportamiento del organismo, un modelo informático de la totalidad de su sistema nervioso. En cierto modo, sería como «cargar una mente en el ordenador», aunque se trate de una mente rudimentaria.

—Davide Castelvecchi

MICHAEL DUNNING, CORBIS (*misil*); SINCLAIR STAMMERS, PHOTO RESEARCHERS, INC. (*gusano*)

AGENDA

CONFERENCIAS

12 de mayo
Moléculas de un asesinato: moléculas criminales y casos clásicos
John Emsley, Universidad de Cambridge
Museo de las Ciencias Príncipe Felipe
Valencia
www.cac.es/acienciacierta

17 de mayo
La fuente de luz de sincrotrón ALBA
Ramón Pascual, Sincrotrón Alba
Ciclo «Desafíos del siglo xxi»
Residencia de Investigadores del CSIC
Barcelona
www.residencia-investigadors.es

EXPOSICIONES

Ötzi, el hombre del hielo
Museo de Prehistoria de Valencia
Valencia
www.museuprehistoriavalencia.es

M.C. Escher. Universos infinitos
Parque de las Ciencias
Granada
www.eschergranada.com



OTROS

20 de mayo – Taller
Química para mayores de 60
Casa de las Ciencias
Logroño
www.logro-o.org/casadelasciencias

26 de mayo – Maratón científico
Trasplantes: Una realidad en España
Alberto Juffé, Hospital Modelo de La Coruña
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
Madrid
www.muncyt.es/mnct/agenda.html

Del 1 al 3 de junio - Jornadas
Los problemas del milenio
Centenario de la RSME
Facultad de matemáticas
Universidad de Barcelona
Barcelona
garf.ub.es/Milenio

PALEONTOLOGÍA

Bisontes contra mamuts

Castores del tamaño de osos, mamuts, caballos, camellos y tigres de dientes de sable solían vagar por Norteamérica hasta que, hace unos 11.000 años, desapareció la mayoría de esos grandes mamíferos. En la actualidad, los expertos siguen debatiendo el motivo de esa extinción a finales del Pleistoceno: ¿un cambio climático, una caza excesiva, alguna enfermedad u otro factor? Eric Scott, responsable del área de Paleontología del Museo del Condado de San Bernardino en Redlands, California, sugiere que la causa fue muy distinta: a saber, la inmigración de los bisontes desde Eurasia.

Basándose en los datos obtenidos en sus excavaciones, así como en otras realizadas desde el siglo xix, Scott afirma que el bisonte apareció en Norteamérica hace 220.000 años y se extendió por el continente durante el resto del Pleistoceno, una época en la que el cambio climático había hecho escasear la comida y el agua. Presentó esta idea la primavera del año pasado, en la revista *Quaternary International*. Propuso que la proliferación de los bisontes en esa época de carestía, junto con el cambio climático, habrían constituido la principal causa de extinción de los grandes mamíferos.

Scott halló la inspiración mientras realizaba una excavación cerca de la ciudad de Murrieta, en California, a principios de los noventa. Algunos años antes, había estudiado en la proximidad unos estratos de entre 760.000 años y 2,5 millones de años de antigüedad, en los que no halló ningún indicio de la presencia de bisontes, pero sí de caballos. Entonces se preguntó: «¿Qué pensarían los caballos cuando aparecieron los bisontes y empezaron a consumir su alimento?» Su equipo realizó más tarde una excavación de los estratos de finales del Pleistoceno en Diamond Valley Lake, cerca de Murrieta, a unos pocos kilómetros del lugar sin indicios de bisontes. Cuando encontró allí fósiles de bisontes y de otros mamíferos, pensó haber dado con la respuesta. «Imaginé que, a medida que los bisontes migraban a esas zonas y su número crecía, el impacto sobre las poblaciones de otros grandes mamíferos resultaría decisivo». Scott recopila ahora datos de otras zonas de Estados Unidos para comprobar que el patrón que observó en la zona sudoeste se cumple también en el resto del país.

El investigador sugiere que los bisontes aventajaban a otros grandes herbívoros en numerosos aspectos. Su estómago múltiple tal vez les permitió aprovechar al máximo los nutrientes de la comida. Y no fue necesario ganar todas las batallas en las que participaron. Bastó con provocar una malnutrición en las hembras lactantes para causar un colapso en la población de otras especies. Los lobos gigantes, leones americanos y otros carnívoros también debieron de desaparecer a causa de la escasez de los grandes herbívoros con que se alimentaban.

—*Rebecca Coffey*



ERIC SCOTT, MUSEO DEL CONDADO DE SAN BERNARDINO (*cráneo de bisonte*)

SISMOLOGÍA

Preparados para el gran terremoto



En los últimos meses se han producido varios terremotos devastadores en el océano Pacífico. En enero de 2010, un seísmo de magnitud 7,0 devastó Haití; en febrero, otro de magnitud 8,8 azotaba el centro de Chile. Christchurch, en Nueva Zelanda, se vio afectada por un temblor de magnitud 7,0 en septiembre, al que siguió una réplica de 6,3 el pasado mes de febrero. El terremoto de magnitud 9,0 que asoló Japón en marzo ocupa el cuarto puesto en la lista de los terremotos más intensos de los últimos 110 años.

Son muchos quienes se preguntan si existe alguna relación entre ellos. Aunque los sismólogos consideran como causa más probable una fluctuación estadística, eso no implica que sea seguro salir de debajo de la cama. El mejor indicador de riesgo sísmico lo proporciona el registro geológico, y los datos más recientes al respecto revelan una historia inquietante, sobre todo en la costa noreste del Pacífico.

Aunque la mayoría considera el sur de California como la región de EE.UU. con mayor probabilidad de sufrir terremotos, existen razones para pensar que, en realidad, es la zona de subducción de Cascadia la que presenta el riesgo más elevado. Esta zona corre paralela a la costa y supone una amenaza para ciudades como Victoria (Columbia Británica), Portland (Oregón) y Eureka (California). Allí, la diminuta placa de Juan de Fuca se desliza hacia el este bajo la placa Norteamericana a una velocidad media de entre 30 y 40 milímetros al año. Sin embargo, el movimiento a lo largo de la superficie de contacto entre ambas parece haber permanecido bloqueado durante siglos. «No podemos ignorar esta zona de subducción y hacer como si no existiera», comenta Chris Goldfinger, geólogo marino de la Universidad de Oregón. «Tras permanecer tranquila durante cientos de años, de repente podría dar un empujón brusco».

Datos recientes indican que la región norte de la zona de subducción (desde el centro de la isla de Vancouver hasta la frontera entre los estados de Washington y Oregón) presenta una probabilidad de entre un 10 y un 15 por ciento de sufrir un terremoto de magnitud 8,0 o superior durante los próximos 50 años. La región sur (desde la frontera entre Washington y Oregón hasta el cabo Mendocino, en California) cuenta con una probabilidad del 37 por ciento de que ocurra lo mismo. Goldfinger y sus colaboradores esperan publicar sus datos en un próximo informe del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Con respecto al siguiente gran terremoto, Goldfinger comenta: «Va a ocurrir. Solo es cuestión de acotar cuándo».

—Sid Perkins

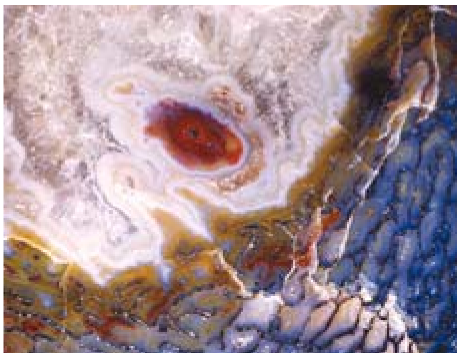
EN DETALLE

¿Cómo se mide la velocidad de las placas tectónicas?

El método más preciso para calcular la velocidad de convergencia entre dos placas tectónicas lo proporciona el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Las mediciones repetidas de la distancia entre dos puntos permite estimar la tasa de convergencia a largo plazo, así como cuantificar desplazamientos bruscos, como el salto de 2,4 metros en dirección este que experimentó Japón durante el terremoto del 11 de marzo.

Antes de la llegada del GPS, los cálculos se basaban en el estudio de las rocas del fondo oceánico. Cuando se enfrían, en estas rocas queda registrada la orientación del campo magnético terrestre. Al conocer las variaciones del campo magnético, resulta posible calcular la tasa de formación de corteza oceánica en las dorsales oceánicas. Otra técnica se basa en el muestreo y cartografía de formaciones rocosas a ambos lados de la frontera entre dos placas; en particular, formaciones con una composición característica o con agregados inusuales de fósiles.

¿QUÉ ES ESTO?



¿Arte o ciencia? Norman Barker es experto en ambas materias. Profesor de anatomía patológica y de arte aplicado a la medicina en la Universidad Johns Hopkins, Barker fotografió con quince aumentos la sección transversal de un hueso de dinosaurio. El hueso (*azul*), que pertenece a una especie desconocida, presenta el tamaño de un plato de café y se descubrió en la formación geológica Morrison, en la meseta del Colorado, donde abundan los fósiles. El óxido de hierro (*rojo*) en la parte ocupada por cuarzo (*blanco*) podría corresponder a médula o hueso esponjoso. Pero el profesor afirma que también podría ser una raíz de árbol que creció y se descompuso a lo largo de millones de años, antes de convertirse en un fósil.

—Ann Chin

DON FOLEY (*placas tectónicas*); NORMAN BARKER (*hueso*)

RADIACTIVIDAD

Radiaciones ionizantes

Sobre la radiación ambiente, sus efectos sobre la salud y el accidente de Fukushima

A raíz de los daños sufridos en la central nuclear de Fukushima como consecuencia del tsunami provocado por el terremoto que asoló Japón el pasado mes de marzo, hemos podido leer gran cantidad de noticias sobre las fugas radiactivas y su impacto ambiental. La variedad y complejidad de los conceptos que subyacen bajo los datos publicados dificultan su interpretación por parte del público y los propios medios. A continuación presentamos una breve guía para orientarse en este mar de información.

La radiactividad es un fenómeno natural que experimentan ciertos núcleos atómicos inestables. Durante su proceso de transformación (desintegración) hacia un estado de menor energía, tales núcleos radian partículas con energía suficiente como para ionizar la materia, motivo por el que pueden resultar perjudiciales para la salud.

Resulta imposible saber cuánto tiempo tardará *un* núcleo en desintegrarse: se trata de un proceso aleatorio que puede tardar desde un nanosegundo hasta miles de millones de años en acontecer. Lo que sí podemos conocer es la *probabilidad* de que un núcleo se desintegre pasado cierto tiempo. Para cuantificarla, se emplea el período de semidesintegración. Esta cantidad expresa el tiempo que debe transcurrir para que, en una muestra de material compuesta por una gran cantidad de núcleos de la misma especie, se desintegren la mitad de ellos. Por ejemplo, transcurridos cuatro períodos de semidesintegración, el número de núcleos radiactivos se habrá reducido en un factor dieciséis.

La *actividad radiactiva* de una muestra nos informa del ritmo al que se producen las desintegraciones. Se cuantifica en becquerelios (Bq). Un Bq equivale a una desintegración nuclear por segundo. Conocidos el período de semidesintegración de una especie y la cantidad de isótopos radiactivos en una muestra, resulta sencillo calcular su actividad. Por ejemplo, el período de semidesintegración del cesio-137 asciende a 30,2 años, por lo que una cantidad de $3{,}13 \cdot 10^{-12}$ gramos de cesio-137 exhibirá una actividad de 10 Bq. Nótese que el período de semidesintegración depende solo del tipo de núcleo considerado, mientras que la actividad depende también del tamaño de la muestra.

Impacto sobre el organismo

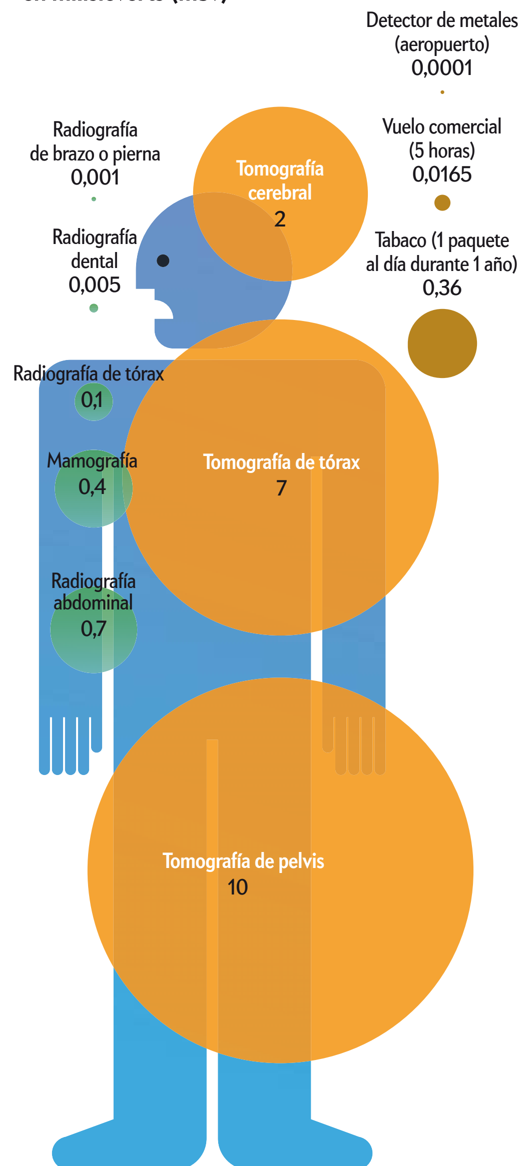
Para cuantificar el efecto sobre el ser humano de las radiaciones emitidas por una muestra, se emplea una magnitud denominada *dosis equivalente*, la cual expresa la energía absorbida por nuestro cuerpo cuando este se ve expuesto a radiaciones ionizantes. La dosis equivalente se define como la energía absorbida por unidad de masa corporal, ponderada según el tipo de radiación, y se mide en sieverts (Sv). Un Sv equivale a un joule por kilogramo, si bien suelen emplearse más a menudo sus submúltiplos, como el milisievert (mSv).

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) es la encargada de fijar los niveles máximos de dosis recomendables para el público y para los profesionales expuestos a la radiación. Para el público en general, se fija un valor máximo de 1 mSv al año; para los trabajadores, 50 mSv anuales, con un límite máximo de 100 mSv acumulados en 5 años.

¿Por qué se fijan esos valores, y no otros? Cuando la radiación ionizante interacciona con tejido biológico vivo, pueden producirse efectos deterministas y efectos aleatorios. Los primeros aparecen a dosis elevadas de radiación. Se observan efectos directos sobre la salud a partir de dosis superiores a 1 Sv. Si un grupo de personas recibe una dosis de 4 Sv, en ausencia de tratamiento médico se pueden producir, transcurridos dos meses, un 50 por ciento de muertes.

Por otro lado, los efectos estocásticos (cáncer y acortamiento no específico de la vida) carecen de umbral. Ello quiere decir que pueden manifestarse tras dosis elevadas, pero también muy bajas. Por ejemplo, se calcula que, tras las explosiones nucleares de Hiroshima y Nagasaki, se produjo 1 muerte por cáncer por cada 13.400 personas que recibieron 1 Sv de dosis equivalente. A partir de estudios similares, se estima el riesgo en función de la dosis recibida. Así, el límite de 50 mSv/año para los profesionales del sector nuclear se fija al imponer que la mortalidad ocasionada

Dosis de radiación equivalente en milisieverts (mSv)



¿Cuánta radiación absorbemos? **La dosis de radiación equivalente proporciona una medida de la energía absorbida por nuestro organismo cuando se ve expuesto a una fuente de radiaciones ionizantes. La energía absorbida por unidad de masa corporal suele expresarse en sieverts (1 Sv = 1 julio/kilogramo). La figura muestra las dosis de radiación asociadas a algunas fuentes habituales de radiactividad.**

por las dosis recibidas en el trabajo no supere a la mortalidad media de un trabajador que realiza otras actividades laborales de riesgo. A efectos de comparación, se estima que fumar 20 cigarrillos al día acorta la vida en unos 6,6 años; un sobrepeso del 20 por ciento, en 2,7 años, y los accidentes de automóvil, en 207 días. Por su parte, la radiación natural acorta la vida en 8 días; las exploraciones con rayos X, en 6 días, y una dosis de 1 mSv al año durante 20 años, en 9,9 días.

Radiactividad natural

A lo largo de la vida, el ser humano se halla expuesto a numerosas fuentes de radiación ionizante. Las fuentes de origen natural se deben, por una parte, a la radiación cósmica (partículas que llegan desde el espacio), y por otra, a la emitida por la superficie terrestre. Al nivel del mar, la tasa media de origen cósmico asciende a unos 31 nanosievert (nSv) por hora. Durante un vuelo intercontinental entre Europa y Norteamérica, la tasa se calcula entre 4000 y 8000 nSv/h. Ello significa que, en un vuelo de 10 horas, la dosis equivalente acumulada vendría a ser de unos 0,04 mSv.

La interacción entre los rayos cósmicos y la atmósfera también genera isótopos radiactivos que pasan a formar parte del entorno. Por ejemplo, la concentración media de tritio (hidrógeno-3, con un período de semidesintegración de 12,3 años) asciende a unos 400 Bq por metro cúbico en el agua continental y a unos 100 Bq/m^3 en el agua de los océanos. Se estima que, por termino medio, una persona recibe por ingestión de agua una dosis equivalente de unos 0,01 microsievert (μSv) al año. En cuanto al carbono-14, su concentración asciende a unos 230 Bq por kilogramo de carbono. Por tanto, una persona contiene en su cuerpo unos 2700 Bq de carbono-14, y recibe por ello una dosis media de unos 12 μSv al año.

La radiación natural de origen terrestre se debe a la desintegración de los radionucleidos primordiales presentes en la tierra y los minerales. Entre ellos se encuentran el potasio-40 (con un período de semidesintegración de 1248 millones de años) y los descendientes radiactivos del uranio-238 (4468 millones de años) y del torio-232 (14.050 millones de años). Otra fuente de radiación natural proviene del radón-222, un descendiente del uranio-238. Cuenta con un período de semidesintegración de 3,82 días. Se trata de un gas noble que el terreno exhala de manera continua y que se encuentra en la atmósfera en cantidades variables. Las concentraciones típicas a 1 metro del suelo oscilan entre los 3 y los 200 Bq/m^3. Sus descendientes, como el plomo-214, el bismuto-214 o el polonio-210, entre otros, son a su vez radiactivos. Durante los episodios de lluvia, el agua arrastra dichos isótopos y los concentra en el suelo, tras lo que pueden registrarse incrementos en la tasa de dosis ambiental de hasta un 50 por ciento.

Radiactividad de origen artificial

Las fuentes de radiación ionizante de origen artificial pueden clasificarse en dos grandes grupos: las que modifican la distribución de los radionucleidos primordiales y las que generan nuevos radionucleidos. La redistribución de los radionucleidos primordiales tiene su origen en actividades como las explotaciones mineras de metales, la industria de abonos fosfatados (rocas con concentraciones de uranio del orden de 1500 Bq/kg), la minería y combustión del carbón, o la extracción de petróleo y gas natural (las plataformas petrolíferas generan aguas residuales con concentraciones de radón-226 de hasta 2000 Bq/m^3).

Al segundo grupo pertenecen los reactores y las armas nucleares de fisión. En el proceso de fisión nuclear se genera un gran número de isótopos radiactivos, cuyos períodos de semidesintegración varían entre las milésimas de segundo y los millones de años. Antes de llegar al reactor, el combustible nuclear contiene solo óxido de uranio, con una proporción isotópica de entre un 4 y un 5 por ciento de uranio-235, y el resto de uranio-238. Al final del ciclo de quemado del combustible, aproximadamente un 3 por ciento de la masa total se habrá transformado en más de 200 especies nucleares, entre productos de fisión, sus descendientes y elementos transuránidos.

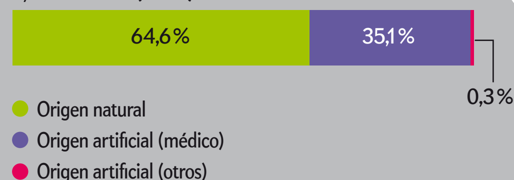
Accidentes, yodo-131 y cesio-137

En caso de accidente en un reactor nuclear, como el ocurrido en Fukushima, del total de isótopos presentes se acostumbra a valorar, en primera instancia, la concentración ambiental de solo dos de ellos: el yodo-131 y el cesio-137. ¿A qué obedece que nos fijemos solo en estos radionucleidos?

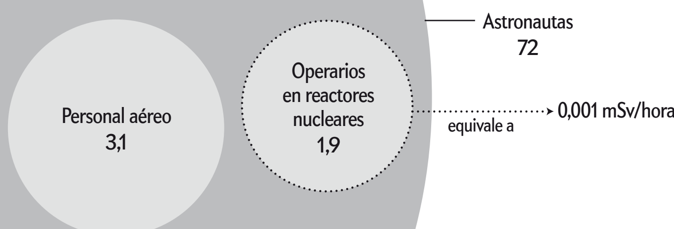
De entre los más de 200 isótopos radiactivos que mencionábamos arriba, podemos descartar los elementos no volátiles, que no podrán escapar de la matriz de óxido de uranio debido a su escasa capacidad de difusión. Los elementos volátiles son siete (Cs, Rb, I, Xe, Kr, Te y Br). De ellos, los gases nobles presentan un escaso impacto ambiental, ya que su incapacidad para formar compuestos impide que puedan incorporarse a la cadena trófica. Si, además, descartamos aquellos isótopos con períodos de semidesintegración inferior a 1 día (pues desaparecen con rapidez), solo nos quedan seis especies (^{132}Te, ^{129}I, ^{131}I, ^{134}Cs, ^{136}Cs, ^{137}Cs). De estos, los isótopos más abundantes instantes después de la parada del reactor son el cesio-137 y el yodo-131, con períodos de semidesintegración de 30,2 años y 8,04 días, respectivamente.

Dosis equivalente media por habitante en España

3,6 mSv/año (total)



Exposición media por encima del fondo natural para profesionales (en mSv/año)



1 mSv/hora fue la dosis recibida por los trabajadores de la central durante la primera semana tras el accidente en Fukushima. Algunos picos de corta duración alcanzaron los 400 mSv. La Comisión Internacional de Protección Radiológica fija un límite máximo de 50 mSv/año. El límite para los operarios de Fukushima se amplió a 250 mSv/año.

FUENTES: DOSIS DE RADIACIÓN, CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR, MADRID, 2010/CONSEJO NACIONAL DE PROTECCIÓN Y MEDIDAS SOBRE LA RADIACIÓN DE EE.UU./FORO INDUSTRIAL ATÓMICO DE JAPÓN/GUILLEM CORTÉS ROSSELL; GRÁFICOS DE CARL DETORRES

El impacto biológico de ambos isótopos en el ser humano se debe a que la glándula tiroides emplea yodo, por lo que una acumulación de yodo radiactivo en dicha glándula puede provocar tumores. Por su parte, el cesio presenta una actividad química similar a la del potasio, de forma que tiende a acumularse en la musculatura. El período biológico de permanencia del cesio-137 en el cuerpo humano se estima en unos 110 días, y el del yodo-131, entre 120 y 138 días. Ambos pueden ser absorbidos por ingestión y por inhalación.

Si tenemos en cuenta el período biológico de ambos isótopos, la radiación emitida y su actividad específica, se puede estimar el *factor de dosis* como consecuencia de su incorporación al organismo. Según la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (EPA), el factor de dosis correspondiente a la incorporación de cesio-137 por inhalación asciende a 8,63 nSv/Bq; por ingestión, a unos 13,5 nSv/Bq. En el caso del yodo-131, el factor de dosis por inhalación es de 292 nSv/Bq y, por ingestión, de 476 nSv/Bq.

Estos valores permiten determinar los límites admisibles en la concentración de dichos radionucleidos en la alimentación y en el aire. Según los datos del Consejo Nacional de Radiación de EE.UU., la concentración de cesio-137 en el aire no debería superar los 2200 Bq/m^3 para un trabajador (lo que equivaldría a una dosis de 50 mSv/año si se respirasen dichas concentraciones durante 40 horas a la semana). Por otra parte, si consideramos una concentración en el aire de 1 Bq/m^3, y si tenemos en cuenta que respiramos unos 2 litros de aire por minuto, deberíamos estar 4,4 años respirando dicha concentración para recibir la misma dosis que la que absorberíamos durante un viaje en avión de 10 horas.

—Guillem Cortés Rossell
Dpto. de física e ingeniería nuclear
Universidad Politécnica de Cataluña

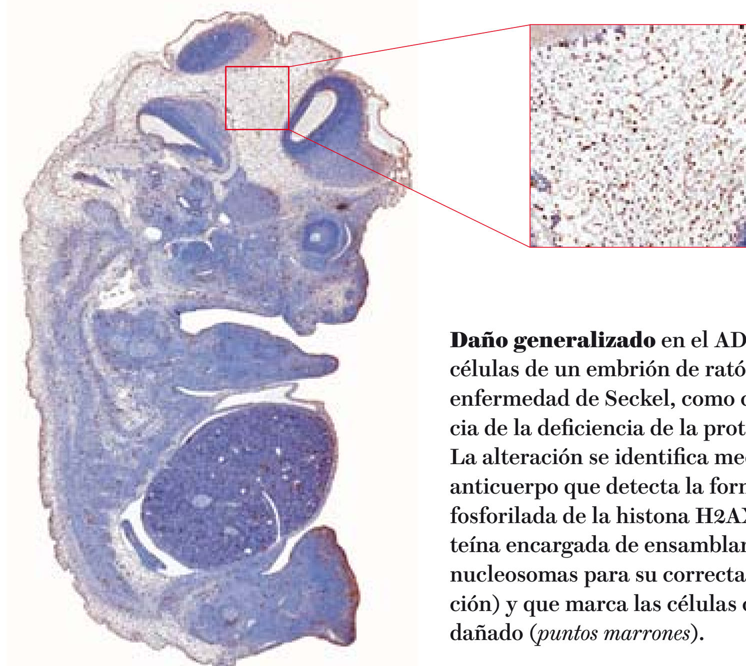
GENÓMICA

Envejecimiento prematuro

El daño en el ADN durante la gestación acelera el envejecimiento futuro

Comprender los procesos biológicos que regulan el envejecimiento de los organismos sigue siendo uno de los objetivos de numerosos trabajos de investigación. En nuestro grupo hemos llevado a cabo un estudio que arroja luz sobre esta cuestión. Hemos desarrollado un modelo murino de una rara enfermedad hereditaria, el síndrome de Seckel. Los afectados presentan una mutación que altera los niveles de ATR, una proteína que protege el genoma de las posibles lesiones que sucedan durante su replicación. El modelo no solo reproduce los síntomas de la enfermedad, sino que nos ha ayudado a descubrir la influencia del estrés fetal en la aceleración del envejecimiento en los mamíferos.

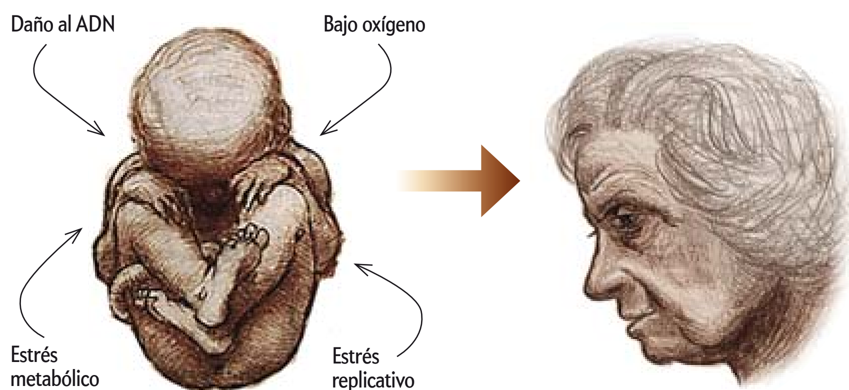
El daño en el ADN es la causa de mutaciones que originan cáncer. Además, datos recientes sugieren que la acumulación de daño genético es responsable de la degeneración asociada al envejecimiento. No es de extrañar que los seres vivos hayan desarrollado mecanismos para evitar semejante alteración. Cabe destacar la «respuesta al daño en el ADN» (RDA) realizada por un conglomerado de proteínas con diversas funciones, desde la detección de las mutaciones, hasta la unión de extremos rotos. Debido a su actividad protectora frente a las mutaciones, estos mecanismos representan barreras antitumorales muy importantes.



Daño generalizado en el ADN de las células de un embrión de ratón con la enfermedad de Seckel, como consecuencia de la deficiencia de la proteína ATR. La alteración se identifica mediante un anticuerpo que detecta la forma fosforilada de la histona H2AX, (proteína encargada de ensamblar el ADN en nucleosomas para su correcta organización) y que marca las células con el ADN dañado (*puntos marrones*).

Las enfermedades genéticas debidas a mutaciones en esas proteínas protectoras suelen caracterizarse por una alta incidencia de cáncer, así como por un proceso de envejecimiento acelerado. Una de las funciones de la RDA consiste en detectar el daño y «avisar» sobre su existencia para ralentizar el resto de los procesos celulares hasta la reparación de la lesión. Esta señalización se hace a través de cascadas de fosforilación en cadena y recae principalmente en dos quinasas (proteínas con capacidad de fosforilar a otras proteínas): ATM y ATR. Mientras que ATM responde al daño exógeno, como el ocasionado por una exposición a radiación, ATR se encarga de señalizar el daño intrínseco generado durante la duplicación del genoma.

Para estudiar la función de esas proteínas, los modelos animales han sido de inestimable ayuda. Pero si bien los ratones con deficiencia de ATM se generaron hace más de un decenio, los modelos deficientes en ATR han planteado una mayor dificultad. Aunque estos han sido generados por el premio Nobel David Baltimore, del Instituto de Tecnología de California, su uso se ha visto limitado por la letalidad celular que implica la eliminación de ATR. La necesidad de ATR para salvaguardar la integridad del genoma durante la replicación la convierte en una proteína esencial. Fi-



Programación intrauterina del envejecimiento. La figura ilustra el concepto que hemos planteado en tiempo reciente: el estrés fetal (en nuestro estudio el ocasionado por el daño en el ADN) puede condicionar la forma y velocidad con la que se envejece en el futuro. Queda por demostrar si otros tipos de estrés intrauterino pueden también acelerar el envejecimiento.

nalmente, una rara enfermedad humana ha resultado clave para el desarrollo de modelos que permitan estudiar esta quinasa tan importante.

Reparación defectuosa

El síndrome de Seckel fue descrito en el año 1960 por Helmut Seckel. Se trata de una enfermedad rara con un cuadro clínico común a otros síndromes ligados a defectos en la reparación del ADN, como neurodegeneración, envejecimiento prematuro, inmunodeficiencias y cáncer. Se caracteriza además por una particular malformación cráneo-facial, por lo que la afección se conoce también como «enanismo de cabeza de pájaro». Las células de los pacientes presentan una respuesta deficiente al daño en el ADN que se produce durante la replicación. En el año 2003 se descubrió una mutación en el gen de la quinasa ATR, posible causante del síndrome. La mutación disminuye la eficiencia de la reacción de corte y empalme del ARN mensajero (ARNm) de ATR, con lo que los niveles de la quinasa resultan casi indetectables pero aún hacen posible la vida. Nuestra estrategia para desarrollar un modelo de Seckel consistió en construir un alelo murino «humanizado» de ATR que reprodujera los defectos de procesamiento del ARNm provocados por la mutación.

Los ratones mutantes obtenidos presentaban niveles muy bajos de ATR y eran una fiel fenocopia de la enfermedad humana. Exhibían enanismo intrauterino, microcefalia (tamaño reducido de la cabeza), además de otras anomalías craneofaciales. Los ratones afectados morían a los cinco meses de edad (la vida media de los ratones de laboratorio varía entre dos y tres años) debido a un envejecimiento prematuro, con la aparición de los siguientes síntomas: pelo gris, curvatura de la columna, osteoporosis, acumulación de grasa en la medula ósea, disminución de la densidad de folículos pilosos, adelgazamiento de la epidermis, etcétera. Sin embargo, al tratar de explicar este fenotipo descubrimos un hecho sorprendente.

Origen intrauterino

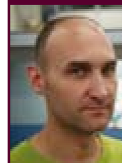
En el envejecimiento natural, la acumulación de daño en el ADN se da de manera gradual a lo largo de la vida. No obstante, los tejidos adultos, envejecidos, de los animales enfermos no presentaban una alteración del genoma muy importante, lo cual resultaba paradójico. El menor tamaño de los animales al nacer nos dio una pista clave para resolver ese enigma. El análisis de los embriones mutantes reveló que el ADN sufría un enorme daño durante la gestación. Cabe recordar que ATR ofrece protección frente a los defectos de replicación del ADN, y que el desarrollo embrionario representa la etapa en que ese proceso sucede más veces y con mayor velocidad. La deficiencia de ATR en esta fase crucial determina el daño producido en el ADN del embrión.

El aspecto de mayor interés de este trabajo reside en la posibilidad de que el estrés intrauterino condicione la velocidad de envejecimiento en el futuro. La idea de que las alteraciones gestacionales puedan ocasionar enfermedades ulteriores no es nueva, concepto conocido como «programación intrauterina». Se sabe así que las enfermedades metabólicas de la madre durante el embarazo incrementan en gran medida la probabilidad de que los hijos padezcan diabetes en el futuro. Pero el



SciLogs

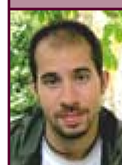
Ciencia en primera persona


Jordi Solé Casals
Tecnología, ciencia y sociedad


Yvonne Buchholz
Psicología y neurociencia al día


Claudi Mans Teixidó
Ciencia de la vida cotidiana


Ramón Pascual de Sans
Física y universidad


Julio Rodríguez López
La bitácora del Beagle


José María Valderas
De la sinapsis a la conciencia


Luis Cardona Pascual
Ciencia marina


Juan García-Bellido Capdevila
Cosmología de precisión

Y más...

www.investigacionyciencia.es/blogs

efecto intrauterino sobre el envejecimiento era desconocido. Nuestro trabajo pone de manifiesto que la acumulación de daño en el ADN durante el desarrollo fetal puede influir en el envejecimiento futuro. Además, queda por ver si otros factores, como el acortamiento de los telómeros (extremos de los cromosomas) o la acumulación de especies reactivas de oxígeno (daño oxidativo), podrían ejercer un efecto similar.

Actualmente barajamos dos hipótesis no excluyentes para explicar la posible influencia de los problemas embrionarios en el envejecimiento. Por un lado, sabemos que la alteración del ADN durante el desarrollo del feto se traduce en la degradación de los nichos de células madre (microentornos que soportan la función de las células madre proveyéndolas de los factores y nutrientes necesarios), hecho que podría condicionar de por vida la capacidad de regeneración de los diferentes órganos.

Otra idea, más especulativa pero también interesante, es la posibilidad de que el daño en el ADN active un programa epigenético que module la expresión de por vida en genes implicados en el envejecimiento. La hipótesis está fundamentada en observaciones previas: existen datos de cambios epigenéticos que alteran la función de genes asociados al envejecimiento. Esta segunda opción tiene además ciertas implicaciones prácticas: si demostrásemos que el envejecimiento está «programado» y conociésemos las «marcas» (modificaciones epigenéticas) que lo provocan, podríamos intentar «desprogramarlo» y extender la vida mediante manipulaciones del epigenoma.

Sea cual sea la explicación, el descubrimiento de que los problemas embrionarios pueden condicionar el envejecimiento futuro quizá sirva para entender, al menos en parte, las diferentes velocidades a las que envejecemos los humanos.

—Matilde Murga
Grupo de Inestabilidad Genómica
Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas, Madrid

EVOLUCIÓN

Monotremas extremos

¿Cómo sobrevivieron los mamíferos ovíparos a sus competidores vivíparos?

Hoy solo quedan en el mundo dos tipos de mamíferos ovíparos: el ornitorrinco, con pico de pato, y los equidnas u hormigueros espinosos (cuatro especies). Estos raros monotremas proliferaban antaño en Australia, hasta que sus parientes marsupiales invadieron la isla, hace entre 71 y 54 millones de años, y los desplazaron.

Antes de abrirse camino hacia Australia, los marsupiales habían migrado desde Asia hasta América y la Antártida. Obligados a luchar contra los animales que se hallaron en su camino, los marsupiales debieron prepararse bien para la competencia, lo que explicaría su éxito abrumador en Australia, según Matthew Phillips, de la Universidad Nacional de Australia en Canberra. ¿Cómo lograron sobrevivir entonces los monotremas?

El grupo de Phillips sugiere que el ornitorrinco y los equidnas resistieron a la invasión de los marsupiales gracias a que sus antepasados se refugiaron en el medio acuático, donde sus competidores no podían seguirlos. Cuando los marsupiales nacen, deben mamar continuamente durante semanas por lo que, si las madres hubieran nadado un tiempo prolongado, las crías se habrían ahogado.

La teoría resulta verosímil para el ornitorrinco, un mamífero anfibio, pero no para los equidnas, que viven únicamente en tierra. Los investigadores realizaron estudios genéticos para aclarar esa cuestión. Descubrieron que los equidnas divergieron del ornitorrinco hace solo entre 19 y 48 millones de años, lo que significaba que tuvieron antepasados semiacuáticos recientes y solo más tarde recolonizaron la tierra. Varias características de los equidnas hacen pensar que presentaron un ancestro anfibio parecido al ornitorrinco: el cuerpo ahusado, la patas posteriores dirigidas hacia atrás (que servirían de timones) y la forma del pico, parecida al del pato, durante el desarrollo embrionario.

Un estudio anterior de fósiles de monotremas primitivos había sugerido que el ornitorrinco y los equidnas divergieron hace más de 110 millones de años, mucho más allá de lo que indicaban los análisis genéticos. Pero el equipo de Phillips volvió a analizar 439 rasgos de estos fósiles antiguos y observó que los equidnas y los ornitorrincos modernos se agrupaban mejor entre ellos que con los fósiles más antiguos. Las estirpes reconstruidas apoyan los hallazgos genéticos de los investigadores, publicados el pasado septiembre en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

De momento no se han descubierto pruebas fósiles de la transición de los equidnas desde el agua. Aunque el registro fósil de los monotremas sigue siendo muy incompleto, hay varias localidades fósiles en Australia de entre 20 y 25 millones de años de antigüedad, la época en que se cree que los hormigueros espinosos aparecieron. Con suerte, las expediciones futuras en esa zona revelarán equidnas fósiles que documenten una transición a partir de una forma parecida a un ornitorrinco.

El oviparismo y otros caracteres primitivos de antepasados distantes, como la escápula de tipo reptiliano, se proponen a veces como datos para explicar la aparente inferioridad de los monotremas. Estos nuevos hallazgos ayudan a reinterpretar los rasgos arcaicos bajo una luz positiva. Por ejemplo, aunque las escápulas reptilianas dificulten la carrera, proporcionan un fuerte apuntalamiento y, junto con la enorme musculatura del hombro y del brazo, ayudan a los equidnas a excavar en el suelo y al ornitorrinco a maniobrar en el agua. «La mayoría de los reptiles poseen también esos rasgos "primitivos" y, sin embargo, en términos de número de especies, han tenido más éxito que ningún otro grupo de mamíferos», añade Phillips.

—Charles Q. Choi



Los mamíferos ovíparos como el ornitorrinco y los equidnas tal vez deban su existencia a que sus antepasados se adaptaron a la vida acuática y evitaron así la competencia de los marsupiales.

NICOLE DUPLAIX *Getty Images*

¿Máquina o humano?

Para crear personajes de videojuegos más realistas, los investigadores se basan en modelos cognitivos de la mente

La consciencia artificial constituye un campo de investigación multidisciplinar cuyo objetivo consiste en comprender los mecanismos que originan la consciencia en el cerebro humano y replicarlos en dispositivos artificiales. Una de sus numerosas aplicaciones se orienta hacia el desarrollo de agentes artificiales, como robots autónomos o personajes de videojuegos, cuyo comportamiento emule al de un ser humano.

Para decidir si la conducta de una máquina resulta tan inteligente como la de un humano, el matemático Alan Turing describió hace más de 60 años la prueba que hoy se conoce como test de Turing. En su versión original, consiste en pedir a una persona, que actúa a modo de «juez», que converse por escrito y mediante un terminal con dos interlocutores sin identificar: una máquina y un ser humano. Si, después de charlar con ambos durante un tiempo razonable, el juez no logra adivinar quién es quién, la máquina puede ser considerada tan inteligente como una persona. Hasta la fecha, ninguna máquina ha superado el test de Turing.

La competición anual BotPrize constituye una adaptación del test de Turing clásico al mundo de los videojuegos. Los participantes han de diseñar un *bot* (un jugador artificial) que engañe a los jueces y les haga creer que es un humano. Hombres y máquinas se enfrentan en *Unreal Tournament 2004*, un videojuego de disparos en primera persona. En la tercera edición de BotPrize, celebrada en Copenhague en agosto de 2010 como parte de la conferencia internacional *IEEE Computational Intelligence and Games*, la victoria fue para el equipo Conscious-Robots, integrado por los autores. Aunque nuestro *bot* no superó esta versión moderna del test de Turing (no fue totalmente indistinguible de los jugadores humanos), logró alcanzar la «tasa de humanidad» más alta hasta la fecha: los jueces confundieron a nuestro *bot* con un humano en el 31,82 por ciento de las ocasiones. Superar el test de Turing equivale a engañar a los jueces un 50 por ciento de las veces.

El diseño de CC-Bot2, el *bot* ganador, se basa en la arquitectura cognitiva CERA-CRANIUM, la cual se fundamenta en diversos modelos cognitivos de la mente. A diferencia de las arquitecturas de control clásicas, CERA-CRANIUM emplea un modelo computacional de la consciencia que se encarga de determinar en cada instante el contenido consciente de la mente del *bot*. Dicho contenido constituye el foco atencional del personaje y modula su toma de decisiones.

El comportamiento de CC-Bot2 durante el juego resulta de la interacción de múltiples procesos que se ejecutan de forma concurrente y que pugnan por participar en un espacio común de trabajo: la memoria a corto plazo. Los diferentes procesadores compiten y colaboran entre ellos para colocar bajo el foco atencional del *bot* los contenidos que generan, de forma que estos se empleen en la toma de decisiones. Algunos ejemplos típicos de este tipo de procesadores son los detectores de ataques enemigos, los de obstáculos, los planificadores de movimiento o el seleccionador de la mejor arma o munición.

La característica fundamental de CC-Bot2 reside en que su comportamiento no obedece a una programación previa, sino que emerge de forma dinámica a partir de la situación del entorno y el procesamiento de esa información. El nivel de activación de los procesadores se recalcula de manera constante y crece de acuerdo con su utilidad esperada. Gracias a dicho mecanismo, CC-Bot2 toma sus decisiones con más «sentido común» que otros *bots*: por ejemplo, se centra en responder al fuego enemigo cuando tiene suficiente munición y no se distrae haciendo acopio de más munición de la necesaria.

—Raúl Arrabales Moreno
y Jorge Muñoz Fuentes
Departamento de informática
Universidad Carlos III de Madrid



IMAGEN CORTESÍA DEL AUTOR, GENERADA CON *UNREAL TOURNAMENT 2004* DE EPIC GAMES

En la competición BotPrize, una adaptación del test de Turing al mundo de los videojuegos, jugadores humanos y *bots* artificiales entablan un combate a muerte todos contra todos en el videojuego de acción en primera persona *Unreal Tournament 2004*. Además de participar en la lucha, los humanos han de identificar cuáles de sus oponentes son *bots*. La manera de jugar de un *bot* resultará indistinguible de la de un humano si logra engañar a los jueces en más de un 50 por ciento de las ocasiones. En la última edición de BotPrize, CC-Bot2, diseñado por el equipo Conscious-Robots, alcanzó el mejor resultado hasta la fecha: fue confundido con un humano un 31,82 por ciento de las veces.



PSICOLOGÍA

Claves de la resiliencia

Cuando la tragedia nos golpea, la mayoría de nosotros nos sobreponemos de manera admirable. ¿De dónde procede tal capacidad?

Gary Stix

En otoño de 2009, Jeannine Brown Miller regresaba a casa con su marido tras haber visitado las cataratas del Niágara. Cerca de la entrada al campus de la Universidad de Niágara, se topó con ambulancias y con un control de carretera. Jeannine sabía que Jonathan, su hijo de 17 años, había salido ese día con el coche. Aunque no entendía por completo lo que sucedía, algo le dijo que debía detenerse. Pidió a uno de los agentes que comprobase si en la matrícula del automóvil accidentado ponía «J Mill». Pocos minutos después, se acercaron un policía y un capellán. Antes de que llegaran a su lado, Jeannine ya sabía lo que iban a decirle.

La pérdida de su hijo —resultado de un problema médico no diagnosticado que le causó la muerte súbita antes de estrellarse contra un árbol— fue devastadora. Durante los días siguientes al fallecimiento de Jonathan, el tiempo se detuvo casi por completo para ella: «La primera semana fue como una eternidad. Vivía no ya por horas, sino minuto a minuto. Me despertaba y no pensaba en nada que no fuera lo que tenía enfrente».

La ayuda le vino de muchos sitios, incluidas sus decisiones personales. Quinientos alumnos del instituto Lewiston-Porter, en el que estudiaba Jonathan, asistieron al velatorio y al funeral, en una demostración de afecto que contribuyó a aliviar su pena. También halló cobijo en su fe católica. A las dos semanas, volvió a su trabajo de asesora financiera, y un par de meses después del accidente ya podía visitar el restaurante en el que había desayunado con su hijo el día en que murió. La comunidad nunca le escatimó apoyo: una ceremonia honró a Jonathan en la fiesta de graduación del instituto; en Facebook, la página *Jonathan «J Mill» Miller* se actualiza con regularidad, y una cafetería local sirve «café 76» en homenaje al que fuera el número del chico en su equipo de fútbol americano. Transcurrido un año, Jeannine aún llora, pero ha encontrado muchas maneras de sobrellevar la pérdida de su hijo.

EN SÍNTESIS

Siempre se ha considerado que la capacidad para reponernos ante los golpes de la vida supone un don poco frecuente, producto de genes excepcionales o de padres talentosos.

Investigaciones recientes sobre sujetos que han sufrido un desastre o la pérdida de un ser querido han puesto de manifiesto que, en realidad, la resiliencia es relativamente común.

La gente se sobrepone ante lo peor que la vida pueda ofrecerles ayudándose de comportamientos dispares. En otros contextos, algunos podrían calificarse de narcisistas o disfuncionales.

Surge así la cuestión acerca de la eficacia de los programas para entrenar la resiliencia, algunos de los cuales ya se han puesto en marcha en escuelas y en el Ejército de EE.UU.

FOTOGRAFÍA DE ADAM VOORHES/DEPARTAMENTO DE PSICOLOGÍA E INSTITUTO DE NEUROCIENCIA DE LA UNIVERSIDAD DE TEXAS EN AUSTIN



Jeannine Brown Miller, **quien sufrió la muerte de su hijo en 2009, toca el árbol contra el que se estrelló el coche de Jonathan.**

FOTOGRAFÍA DE JOHN HRYNIUK

Cuando acontece lo peor —la muerte de un familiar, un atentado terrorista o una epidemia devastadora—, siempre experimentamos una profunda conmoción y desorientación. Sin embargo, los neurólogos y psicólogos que investigan las consecuencias de una tragedia han descubierto algo sorprendente: la mayoría de las víctimas comienzan a recuperarse pronto y, con el paso del tiempo, reaparecen con sus emociones casi intactas. La mayoría de nosotros demostramos poseer una asombrosa habilidad natural para la resiliencia, la capacidad de sobreponernos a lo peor que la vida arroje en nuestro camino.

Hoy, además de las herramientas habituales en psicología, las imágenes cerebrales y las bases de datos genéticos están revelando los mecanismos que posibilitan la resiliencia. Cuando sobreviene el desastre, una serie de factores bioquímicos, genéticos y conductuales se combinan para restaurar nuestro equilibrio emocional. La investigación actual trata de entender los fundamentos de la fortaleza emocional para que, algún día, la comprensión del fenómeno nos diga qué hacer cuando fallan los procesos curativos naturales.

Mientras tanto, el sistema educativo, el Ejército o el mundo empresarial no parecen dispuestos a esperar un cuadro completo de genes y neurotransmisores para embarcarse en programas que nos ayuden a sobrellevar las peores tensiones nerviosas. A falta de un manual definitivo sobre el aguante y la recuperación, se ha entablado un vigoroso debate acerca de la conveniencia de manipular lo que tal vez no sea sino una cualidad innata. En EE.UU., la controversia reviste una urgencia particular: en lo que quizá constituya una de las mayores intervenciones psicológicas jamás emprendidas por una institución, el Ejército ha comenzado un enorme programa para entrenar la resiliencia en más de un millón de soldados y sus familias.

LOS MECANISMOS DE LA RESILIENCIA

Sigmund Freud escribió en 1917 acerca del «trabajo de duelo», un proceso que serviría para recuperar la energía emocional —o libido, como él la denominó— que, con anterioridad, habíamos invertido en un «objeto ahora inexistente»; esto es, alguien fallecido. Esta noción de la psique como un sistema de fontanería que canaliza las fuerzas subliminales de la vida prevaleció durante largo tiempo, pues no sería sino hasta hace unos decenios cuando algunos psicólogos y neurólogos comenzaron a aportar pruebas a favor de explicaciones alternativas.

Una de las cuestiones que empezaron a considerarse fue la naturaleza de la resiliencia. El término (de las voces latinas *re*, «hacia atrás», y *salire*, «saltar») incorpora a la psicología el léxico de las ciencias naturales. Según Christopher M. Layne, que investiga los mecanismos de la resiliencia en la Universidad de California en Los Angeles: «[El término] significa que, tras un breve lapso de tiempo, rebotamos otra vez hacia un estado operativo». Valga como analogía una varilla de metal que se dobla cuando se la presiona y que recupera con rapidez su forma inicial cuando la fuerza deformadora desaparece. Sin embargo, a pesar de lo sencillo del ejemplo anterior, la biología de la resiliencia reviste una complejidad enorme.

La resiliencia comienza a un nivel muy básico. Pongamos por caso que alguien le va a propinar un puñetazo. Su hipotálamo disparará una señal de estrés en forma de la hormona liberadora de corticotropina; ello desencadenará una avalancha de sustancias que le indicarán que levante los puños o que salga en estampida. El cerebro palpita como una luz intermitente: lucharescapar, pelea-fuga, pero después el tifón hormonal amaina. Si usted fuese llamado de manera constante a defender el terreno, no se interrumpiría el flujo de hormonas del estrés. Una de ellas, el cortisol, segregado por las glándulas suprarrenales, deteriora las neuronas del hipocampo y de la amígdala. Estas dos zonas intervienen en la memoria y las emociones, por lo que, a la larga, acabaría usted convertido en un despojo físico y emocional. Por fortuna, la resiliencia acude en nuestro auxilio en la gran mayoría de los casos.

Gracias a la ayuda de otras sustancias, la producción de hormonas del estrés parece interrumpirse con mayor facilidad en las personas resilientes. Durante los últimos años, se han descubierto varios marcadores biológicos que reflejarían la capacidad de resistencia emocional de un individuo. La lista incluye sustancias como la dehidroepiandrosterona (DHEA), que amortigua los efectos del cortisol; o el neuropéptido Y, el cual reduciría la ansiedad al contrarrestar los efectos de la hormona liberadora de corticotropina. En el año 2000, Dennis S. Charney y otros investigadores del Hospital de West Haven, asociado a la Universidad de Yale, comprobaron que los soldados con altos niveles del neuropéptido Y en la sangre sobrellevaban mejor el intenso estrés al que fueron sometidos durante un interrogatorio ficticio. En 2006, Rachel Yehuda y sus colaboradores del Hospital de Veteranos del Bronx descubrieron que, entre los excombatientes, un nivel elevado de dicha sustancia implicaba un menor riesgo de padecer trastorno de estrés postraumático.

Son numerosas las rutas bioquímicas que contribuyen a algo tan polifacético como la resiliencia. Por el momento, sin embargo, apenas contamos con un tosco boceto del perfil biológico que caracteriza a la persona tenaz. En mayo de 2010, Eric J. Nestler y sus colaboradores, del Hospital del Monte Sinai, refirieron la existencia de una proteína, DeltaFosB, que parecía proteger a ratones —y quizá también a humanos— contra la angustia derivada de la soledad, el aislamiento o la amenaza de múridos más agresivos. DeltaFosB actúa como un interruptor molecular que activa una serie de genes y desencadena la producción de las proteínas que estos codifican. En roedores resilientes se re-

gistraron altos niveles de la proteína; por otra parte, el análisis *post mortem* del tejido cerebral de pacientes con depresión reveló una deficiencia de DeltaFosB. Parece, pues, que un fármaco que elevase el nivel de dicha proteína quizá protegiese contra la depresión y estimulase la resiliencia.

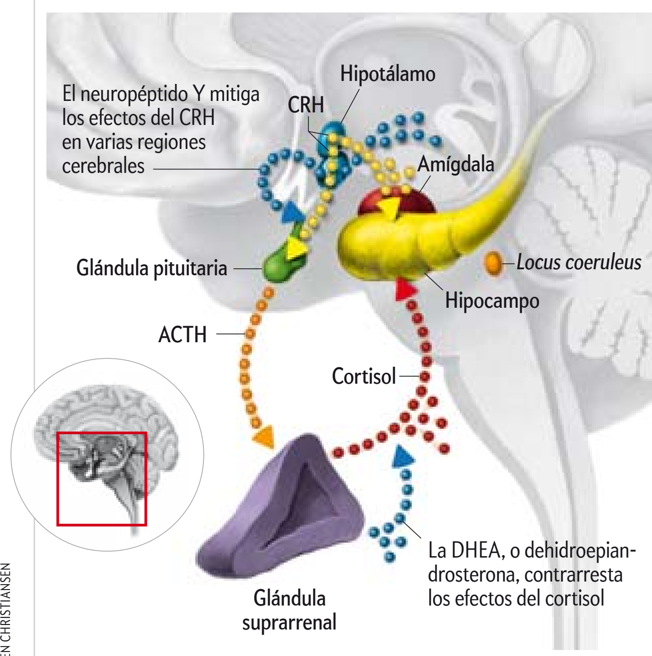
Sin embargo, aún habrá de pasar un tiempo antes de que llegue un fármaco que aumente nuestra fortaleza emocional. Puede que algún día se sintetice una píldora que eleve la producción de DeltaFosB, pero, hoy por hoy, la investigación sigue limitada al caso de los roedores. Por lo que sabemos, la sustancia no solo ayuda a los ratones a soportar los mejores esfuerzos de quienes intentan aterrorizarlos hasta la muerte, sino que se sospecha que genera también las típicas sensaciones de recompensa características de otro efecto mucho menos deseable: la drogadicción.

Quizá contribuyan otros genes y proteínas, pero, al igual que con DeltaFosB, los expertos deberán proceder con pies de plomo. El gen *5-HTT*, al que una vez se le consideró «el gen de la resiliencia», sirve de aviso a las trampas que puede tender un enfoque puramente genético. En torno a un decenio atrás, unos cuantos estudios mostraron que las personas que poseían la versión más larga de ese gen parecían resistir mejor la depresión. El gen saltó a la fama en 2006, cuando un artículo en *The New York Times Magazine* anunció la inminente comercialización de un test de *5-HTT*, que serviría para evaluar la fortaleza emocional. El optimismo inicial no tardó en convertirse en agua de borrajas (algo frecuente cuando se intenta vincular un comportamiento complejo a un solo gen). Dos metaanálisis hallaron que los presuntos indicios no confirmaban ningún nexo entre las variantes del gen *5-HTT* y la depresión inducida por otras circunstancias. Otro estudio sí encontró una conexión; pero, si el gen se encuentra relacionado con la resiliencia, el vínculo es débil. Puede que en última instancia la psicobiología acabe ofreciendo fármacos y terapias más precisas. Pero, por ahora, no parece que los próximos avances vayan a proceder del estudio de un gen o un receptor celular. Mucho más prometedoras se antojan las entrevistas a la vieja usanza con sujetos inmersos en una crisis personal.

FACTORES NEUROLÓGICOS

Reducir la alarma

Ante una amenaza, en el cerebro se desencadena una cascada de sustancias que nos llaman a hacer frente al peligro o a huir de él. A su vez, otros procesos amortiguan dicha respuesta, con lo que contribuyen a la resiliencia contra el estrés. Uno de los ciclos clave comienza cuando el hipotálamo produce la hormona liberadora de corticotropina (CRH), lo que provoca que la glándula pituitaria segregue adrenocorticotropina (ACTH). Una vez en el torrente sanguíneo, esta última activa las glándulas suprarrenales, las cuales liberan cortisol. Esta sustancia mejora la capacidad para responder ante situaciones de desafío, pero, con el tiempo, su exceso puede ocasionar trastornos duraderos. Para mantener el proceso bajo control, una serie de sustancias (*debajo*) amortiguan la respuesta. Los fármacos y la psicoterapia podrían estimular la producción de estos controladores del estrés.



JEN CHRISTIANSEN

«ADAPTACIONES FEAS»

La psicología conductual lleva décadas acumulando datos sobre niños y adultos que han sufrido un trauma. George A. Bonanno, de la Escuela de Profesores de la Universidad de Columbia, ha dedicado su carrera a documentar los distintos tipos de resiliencia, sobre todo en los casos de muerte de un ser querido y ante las situaciones de guerra, terrorismo o enfermedad. Sus resultados han mostrado que, sea cual sea la adversidad, la mayoría de nosotros nos recobramos de manera sorprendente y, al cabo de unos meses, la vida vuelve a la normalidad.

Bonnano comenzó a investigar la resiliencia en los años noventa, cuando trabajaba en la Universidad de California en San Francisco. Por aquellos días, la opinión mayoritaria sostenía que la pérdida de un ser querido dejaba cicatrices emocionales indelebles y que se requería el penoso duelo freudiano o un reconstituyente similar para restituir la normalidad. Bonanno y sus colaboradores afrontaron el asunto sin prejuicios. En sus experimentos no hallaron indicios de heridas psíquicas. Eso les llevó a pensar que el factor dominante era la resiliencia psicológica, la cual no tendría por qué ser exclusiva de individuos con genes excepcionales o padres talentosos. La idea planteó también la inquietante pregunta de si las versiones modernas del duelo aflictivo acabarían produciendo más daños que beneficios.

En un ejemplo de su trabajo, Bonanno y su colaborador Dacher Keltner analizaron las expresiones faciales de personas que hacía poco habían perdido a algún ser querido. Los vídeos no mostraron indicios de una pena permanente que requiriese ser extirpada. Revelaban tristeza, como cabría esperar, pero también enfado y alegría. Una y otra vez, el abatimiento de una persona golpeada por el dolor se transmutaba en hilaridad, y viceversa. ¿Eran sinceras las risas? Al ralentizar los vídeos, se fijaron en el músculo orbicular de los párpados, cuyos movimientos, conocidos como expresiones de Duchenne, confirman la sinceridad de la risa. Resultó que los dolientes mostraban lo que sentían. Esa oscilación entre tristeza y júbilo se repitió estudio tras estudio.

¿Qué significaba todo eso? Bonanno conjetura que la melancolía sí nos ayuda a sanar tras una pérdida. Pero la pena implacable, como la depresión clínica, resulta demasiado dura de soportar. Por ello, algún mecanismo evitaría que la mayoría de nosotros quedemos atascados en un estado psicológico incon-



El huracán Katrina puso a prueba la resiliencia de cuantos residían en Nueva Orleans.

MARKO GEORGIEV/GETTY IMAGES

solable. Si nuestras emociones se exaltan o se enfrían demasiado, una suerte de sensor interno —llamémoslo «resiliencia inmediata»— nos devuelve al equilibrio.

Bonanno amplió sus estudios a víctimas de abuso sexual, a neoyorquinos que habían sufrido los ataques del 11 de septiembre y a residentes de Hong Kong que habían sobrevivido a la epidemia de síndrome respiratorio agudo severo (SRAS). En todos los casos observó reacciones similares. Inmediatamente después de la muerte, la enfermedad o el desastre, entre uno y dos tercios de los entrevistados experimentaban pocos síntomas (si es que mostraban alguno) que merecieran calificarse como traumas: dificultades para dormir, hipervigilancia o *flashbacks*, entre otros. A los seis meses, el número de quienes continuaban afectados disminuía a menos del 10 por ciento.

Pero, si la mayoría no sufría un daño duradero, ¿qué sentían? ¿Habían escapado incólumes? Resultaba difícil saberlo. La introducción en 1980 del trastorno de estrés postraumático (TEPT) en el *Manual diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales* había limitado sobremanera las miras de los psicólogos. El marco que establecía el volumen de referencia del diagnóstico psiquiátrico había empujado a los expertos a concentrarse solo en aquellos que se ajustaban a los síntomas del TEPT. La nueva denominación del trauma metió en un mismo saco a todos los pacientes con síntomas de estrés, aun cuando muchos de ellos podían arreglárselas solos.

Bonanno comenzó a estudiar los sentimientos de aquellos que no habían buscado ayuda psicológica. Algunas personas objeto de estudio distorsionan de manera notoria sus recuerdos al rellenar cuestionarios: cuando su mundo se desmorona, exageran sobre lo mal que van las cosas o sobre lo catastróficas que fueron. Para compensar, Bonanno empezó a realizar estudios prospectivos, en los que siguió a grupos de varias edades desde antes de que muriese alguno de sus integrantes. Con ello lograba eliminar lo que en psicología se conoce como «sesgo en el recuerdo». También se decidió por una refinada técnica estadística (los modelos de curva de crecimiento latente) para describir con mayor precisión la serie de reacciones que se experimentan tras un trauma.

Al igual que en los estudios previos sobre la risa, una mirada más incisiva al proceso captó una amplia gama de respuestas que no encajaban con facilidad en lo que venía siendo habitual calificar como una adaptación saludable. La falta de una categorización sistemática movió a Bonanno a etiquetar como «adaptaciones feas» aquellas reacciones que se alejaban de las consideradas clásicas. Algunas personas mostraban tendencia al autoenaltecimiento, distorsiones de su persona o de sus actos que, en otras circunstancias, habrían rayado en el narcisismo. Para el doliente, actuar de esa manera evitaría una reflexión obsesiva: ¿podría haber hecho algo para impedir que aquello sucediese?

El enaltecimiento del ego no era la única estrategia. Algunos sujetos reprimían las emociones y los pensamientos negativos; otros simplemente se convencían de que podrían manejar cualquier cosa que les saliese al paso. Había hasta quien sonreía o reía a sus anchas. Muchos psicólogos afirmarían que tales reacciones no constituyen sino una negación perjudicial de la realidad. Por su parte, Bonanno halló que la adaptación «fea» no era exclusiva de los afectados por una muerte, sino que también la constató entre civiles bosnios del conflicto en los Balcanes o en testigos de los atentados contra las Torres Gemelas.

Fred Johnson afrontó a su modo las secuelas del huracán Katrina. De 57 años y residente durante toda su vida en Nueva Orleans, Johnson respondió al Katrina colaborando con los equipos de salvamento en el Superdome, el estadio que fue devastado por el huracán. Las colas desde el recinto hasta los autobuses para abandonar la ciudad ofrecían un espectáculo estremecedor. Algunos padres se encontraban tan angustiados que intentaban entregar sus hijos a los equipos de rescate. Horrorizado al presenciar la escena por primera vez, Johnson perdió el control. Se alejó de la entrada del edificio y rompió a llorar. Pero, a los pocos minutos, notó los efectos de lo que él llama su «director» y se detuvo: «Cuando me veo abrumado, creo que mi proceso es este: voy a llorar, voy a restregarme los ojos y voy a volver al trabajo; pero lo que no voy a hacer es seguir llorando y llorando. Creo que es mi director. Es lo que impide que me vuelva loco».

Si bien el trabajo de Bonanno ha ganado adeptos, no todos se hallan convencidos de que la resiliencia sea tan innata como él sugiere. Algunos disienten de su definición del término, que consideran demasiado general. Bonanno reconoce que la adversidad en la infancia puede acarrear consecuencias más persistentes que las emociones pasajeras derivadas de una muerte en la familia o un desastre natural. Sin embargo, las reacciones de la mayoría de los adultos, ya sea ante la pérdida de un empleo o ante un maremoto, revelan que la capacidad para recuperarse sigue siendo la norma a lo largo de la vida.

SÉ TODO LO QUE PUEDAS SER

Si la resiliencia forma parte del *statu quo* para casi todos nosotros, ¿qué hay del 10 por ciento que no se sobrepone al trauma emocional y se atasca en la ansiedad y la depresión? ¿Es posible entrenarlos para que se repongan? Se trata de una cuestión aún por dilucidar, pero las pruebas disponibles sugieren precaución.

Los psicólogos y asistentes sociales que socorren en desastres y emergencias recurren a menudo a los «partes de estrés en incidentes críticos», informes en los que se pide a un individuo o a un grupo que relate sus experiencias a fin de que expurgue síntomas incipientes de trauma. Pero varios estudios a lo largo de más de 15 años han demostrado que el método no resulta eficaz y que puede causar daños. En ocasiones, durante una sesión de grupo, una persona desquiciada puede contagiar su pánico y dificultar el progreso de la mayoría. Tras el tsunami de 2004 en el océano Índico, la Organización Mundial de la Salud alertó contra de este tipo de informes, ya que contribuían a la inseguridad de algunas víctimas. La experiencia con este método también cuestiona otros más recientes, que persiguen inculcar la resiliencia mediante técnicas asamblearias inspiradas en la psicología positiva.

El movimiento de la psicología positiva experimentó su presentación formal en sociedad en 1998, cuando Martin E. P. Seligman, de la Universidad de Pennsylvania, defendió en el congreso anual de la Asociación Americana de Psicología que el trastorno no debería constituir la única preocupación de la disciplina. Seligman llegó a la psicología positiva tras descubrir que, tras serles administrados electrochoques, los perros entraban en un estado de sumisión lamentable, que él denominó «indefensión aprendida». Ello le sirvió de inspiración para explorar las intervenciones clínicas que consiguen justo lo contrario: alentar el optimismo, el bienestar y, sobre todo, la resiliencia.

Hace dos décadas, Seligman jugó un papel decisivo en la creación del Programa de Resiliencia de Pennsylvania, el cual ha mostrado su eficacia entre niños en edad escolar. Diseñado a partir de las teorías sobre la depresión, el entrenamiento incluye técnicas como la reestructuración cognitiva, empleado por los psicólogos cognitivo-conductuales para que los pacientes revisen sus pensamientos bajo una luz más positiva. Las evaluaciones del programa a través de 21 estudios controlados sobre 2400 niños de entre 8 y 15 años demostraron su éxito a la hora de evitar la depresión y la ansiedad.

Hoy por hoy, el Ejército de EE.UU. aplica métodos similares con más de un millón de soldados y sus familias, en lo que ya ha sido calificado como «la mayor intervención psicológica deliberada» que se haya intentado jamás. Bajo el programa, de 5 años y dotado con 125 millones de dólares, 800.000 soldados ya han comenzado a utilizar una «herramienta de evaluación global» en línea (un test psicológico que mide, entre otros factores, el bienestar emocional y espiritual) y siguen cursos para mejorar la resiliencia. Cada mes, 150 soldados toman clases en la Universidad de Pennsylvania para después enseñar a otros cómo entrenar la resistencia emocional en el ejército. Seligman prevé que la información obtenida en estos programas pasarán a formar parte de una ingente base de datos que, después, expertos civiles aprovecharán para sus investigaciones sobre la resiliencia. «Es ciencia a un nivel al que la psicología nunca había llegado antes», opina Seligman.

William Casey, Jefe del Estado Mayor del Ejército de los EE.UU., manifestó su entusiasmo desde el principio. No obstante, ningún estudio piloto evaluó si un programa que había funcionado bien con adolescentes se ajustaría a un soldado que regresa a Irak por tercera vez. «Aunque es cierto que lo estamos construyendo en el aire, el seguimiento y la evaluación son constantes y rigurosos», observa Seligman.

Bonanno, por su parte, apunta que el programa carece de pruebas que demuestren su eficacia. Y, a juzgar por la variopinta historia de las intervenciones previas, se pregunta si podría resultar más perjudicial que beneficioso. Bonanno colaboró en un estudio no publicado en el que se monitorizó a 160.000 soldados, la mitad de los cuales estuvo destinada al menos una vez en Irak o en Afganistán. El 85 por ciento de ellos fueron calificados como resilientes, pues no mostraron síntomas de trauma; solo entre el 4 y el 6 por ciento fueron diagnosticados con TEPT. «Si la mayoría son resilientes, como parecen indicar todos nuestros estudios, ¿qué les ocurre a esas personas tras un tratamiento inoculador de estrés?», se pregunta Bonanno. «¿Es posible que su resiliencia disminuya? Esa es la pregunta que considero imperativo responder.»

No todo el Ejército ha aceptado el entrenamiento de la resiliencia. William P. Nash, quien supervisó en el pasado los programas de control de estrés para la marina estadounidense, afirma que existen pocas pruebas que garanticen la eficacia de semejante adiestramiento. Compara la situación en el Ejército con la del fútbol profesional: con independencia de cuánto entrenen los jugadores durante la semana, aún se les vapulea y se lesionan los domingos. «Resulta imposible evitar acontecimientos desafortunados», afirma Nash. «Del mismo modo, tampoco puede impedirse que la gente resulte afectada por el estrés.»

¿Cabe hacer algo que aumente la capacidad de una persona para arreglárselas bien frente a la adversidad? Proporcionar de antemano los instrumentos para manejarse puede funcionar o no. Las terapias farmacológicas se han desechado hace años. Tras un desastre, los mejores expertos —psicólogos y profesionales de la salud del Centro Nacional para el TEPT de EE.UU.— han perfeccionado un enfoque que, en lugar de hurgar en sus reacciones psicopatológicas, busca potenciar la capacidad del individuo para reponerse. «Si alguien se encuentra bien, admitimos que lo está», puntualiza Patricia Watson, quien ayudó a crear la técnica cuyo nombre formal, «primeros auxilios psicológicos», ya implica que muchos manejan bien las cosas por sí solos. En primer lugar, se atienden las necesidades prácticas de los afectados: comida y alojamiento. Pero también se informa a las víctimas de la ayuda de la que disponen y se les enseña a monitorizar sus progresos. Tras los atentados del 11 de septiembre, algunos de quienes se hallaban en las inmediaciones de las Torres Gemelas esperaban que la angustia y la depresión apareciesen a los tres meses, por lo que ignoraron la ayuda concebida para aquellos que padecían algo más que síntomas pasajeros. «La gente sufrió durante más tiempo de lo necesario porque creía que se trataba de algo normal», afirma Watson. Ante los casos de verdadero TEPT, las terapias farmacológicas y las cognitivo-conductuales, que exponen al paciente ante el origen del trauma, sí han mostrado cierta efectividad.

Las investigaciones sobre la resiliencia han puesto de manifiesto que una misma fórmula no sirve a todos por igual. En ocasiones acontece lo peor. Pero nuestra capacidad de recuperación innata contribuye a que, la mayoría de las veces, las cosas acaben bien.

Gary Stix *es redactor de* Scientific American.

PARA SABER MÁS

The other side of sadness: What the new science of bereavement tells us about life after loss. George A. Bonanno. Basic Books, 2009.
Flourish: A visionary new understanding of happiness and well-being. Martin E. P. Seligman. Free Press, 2011.

Gregory A. Babbitt es biólogo evolutivo. Su trabajo se centra en la evolución de la regulación génica en eucariotas y los métodos estadísticos en evolución molecular. Obtuvo su doctorado en zoología en la Universidad de Florida y actualmente es profesor del Instituto de Tecnología de Rochester.



GENÉTICA

Evolución de la cromatina

A pesar de la gran cantidad de información que poseemos sobre el cromosoma, queda todavía mucho por conocer acerca de su función y evolución

Gregory A. Babbitt

El citólogo estadounidense Edmund Beecher Wilson, de la Universidad de Columbia, publicó en 1897 su gran obra *The cell in development and inheritance* («La célula en el desarrollo y la evolución»). En ella, Wilson sintetizó el conocimiento de los últimos 40 años acerca de la función hereditaria del núcleo celular; antes incluso del redescubrimiento, en 1900, del trabajo de Gregor Mendel, que sentó las bases de la genética moderna. Tras lo cual, Nettie Stevens (colaboradora de Wilson) y sus alumnos Walter Sutton y Thomas Hunt Morgan precisaron empíricamente el papel del cromosoma en la determinación del sexo y la transmisión de la información genética. Años después, Alfred Sturtevant y Hermann Muller, alumnos de Morgan, indujeron artificialmente las primeras mutaciones en el laboratorio y dispusieron del primer mapa genético de un cromosoma.

El libro magistral de Wilson combina la observación microscópica meticulosa de la actividad celular con el conocimiento obtenido de la manipulación de muestras de células. La obra refleja un período de tiempo excepcional para la biología, en el que se produce la transición de una ciencia descriptiva basada en la observación a una ciencia fundada en experimentos cuidadosamente diseñados. Una de las ideas más notables que Wilson dedujo de los primeros experimentos es que el «idioplasma», o cromatina, constituye la sede física de la herencia. La cromatina es el complejo de ADN y proteínas que forman los cromosomas. Otra de las ideas revolucionarias de este investigador fue la descripción de la cromatina como una sustancia dinámica y activa en el núcleo. Los citólogos de la época de Wilson habían observado que la cromatina se movía por el núcleo y cambiaba totalmente de aspecto antes de la división celular: una masa difusa se convertía en hebras compactas que podían visualizarse fácilmente. Wilson reprodujo los diagramas del ci-

Esta microfotografía electrónica de transmisión muestra el ADN desenrollado, después de ser tratado con sales que destruyen las uniones y las interacciones electrostáticas que configuran la cromatina.

DON W. FAWCETT/PHOTO RESEARCHERS, INC.

EN SÍNTESIS

La estructura aparentemente simple de la molécula de ADN parece dar a entender que la función principal del núcleo celular consiste en almacenar una gran cantidad de información en un código de cuatro letras.

Sin embargo, cada vez más se reconoce la influencia de la disposición espacial de la cromatina (el complejo de ADN y las proteínas histonas) sobre la actividad de los genes, así como la acción modeladora de la evolución sobre la estructura de la cromatina.

Mientras que la estructura primaria de la cromatina se halla definida por la posición de los nucleosomas (formados por histonas) en el ADN, en niveles superiores de organización la cromatina es más plástica y se halla sujeta a los cambios ambientales.





Edmund Beecher Wilson en un retrato de los años veinte del siglo pasado. Su libro *The cell in development and inheritance* («La célula en el desarrollo y la evolución») fue una de las obras que sentaron las bases de la biología celular.

tólogo italiano Galeotti, quien documentó los cambios profundos en la cromatina como respuesta a algunas enfermedades o toxinas ambientales.

Algunas veces, los libros de texto omiten el dinamismo de la cromatina y representan el cromosoma como una biblioteca estática en la que genes de suma importancia se ordenan meticulosamente. En todas las épocas, el reconocimiento de la naturaleza dinámica de la cromatina entra en contradicción con su influencia potencial sobre la herencia. ¿Cómo algo aparentemente tan mutable en una escala de tiempo celular puede mantenerse casi invariable durante largos períodos de escala evolutiva?

Los biólogos de mediados del siglo xx dejaron de lado el efecto de la dinámica cromosómica en el funcionamiento de la célula y centraron su atención en las bases moleculares de la herencia, tras descubrirse en 1953 la estructura química del ADN. Un año antes, Alfred Hershey y Martha Chase habían demostrado que el ADN contenía la información genética y que las proteínas nucleares no constituían material hereditario. En la mayoría de los experimentos que revelaron la función del ADN se habían empleado bacteriófagos, o fagos. En estos virus, que afectan a las bacterias, el ADN no se halla asociado a las proteínas que normalmente lo empaquetan y controlan su acceso; ello contribuyó a pasar por alto que la estructura de la cromatina era un elemento integral de control genético. El interés por descubrir los niveles superiores de organización estructural (enrollamiento, empaquetamiento y plegamiento) del ADN nuclear de la célula eucariota iba en aumento. Sin embargo, durante muchos años no avanzó, ya que los motivos estructurales de la cromatina apenas son distinguibles al microscopio, y todavía no se disponía de las técnicas de cristalografía de rayos X, el caballo de batalla en la visualización de las macromoléculas.

Incluso el trabajo decisivo de François Jacob y Jacques Monod sobre la regulación génica en bacterias ayudó a propagar la idea clásica de que la estructura de la cromatina no influía sobre la actividad génica. De acuerdo con el modelo de Jacob y Monod, los genes son transcritos o silenciados por factores proteicos que se unen directamente a las secuencias de ADN, que controlan así a los genes adyacentes. La imagen parecía tan sencilla y completa que no hubo necesidad de asignar función alguna a la estructura de la cromatina. La atención se centró entonces en la búsqueda de los factores proteicos que controlaban a los genes.

La estructura aparentemente simple de la molécula de ADN, una doble hélice regular cuya única variabilidad viene dada por la secuencia de bases nitrogenadas, parece dar a entender que la función principal del núcleo celular consiste en almacenar una gran cantidad de información en un código de cuatro letras. Como señaló en 1953 Francis Crick en una carta a su hijo Michael, la característica codificante del material genético, y no los niveles superiores de la estructura molecular, determina que «la vida proceda de la vida».

El inconveniente principal de esa idea, teniendo en cuenta que las células empaquetan el ADN en la cromatina, es que ignora la probable influencia de los rasgos estructurales y biofísicos del ADN y de los complejos ADN-proteínas sobre la expresión de la información. Para cuantificar ese efecto se necesita observar la superestructura del cromosoma, pero también la fina variabilidad química y espacial que confieren las curvas y los giros del ADN, que comprimen o amplían los surcos de la hélice y modulan la fuerza de las cargas que interaccionan a lo largo de la molécula. Ambos efectos cambian las propiedades de unión del ADN.

Los biólogos de hoy muestran especial interés por la dinámica del funcionamiento molecular del nucleosoma, la unidad básica de la cromatina. Los nucleosomas se forman cuando el ADN envuelve una partícula proteica de histonas. La mayor parte del ADN de la célula se halla empaquetado en los nucleosomas. Sin embargo, no se conocen muy bien algunas de sus propiedades fundamentales: la manera en que se determina su posición en el ADN, el papel que desempeñan en la regulación génica y su posible efecto sobre la evolución de los sistemas reguladores. Cada vez se aprecia más la necesidad de tener una visión completa de la función de la cromatina, tanto a pequeña como a gran escala, para avanzar en el conocimiento de este tema clave en la biología.

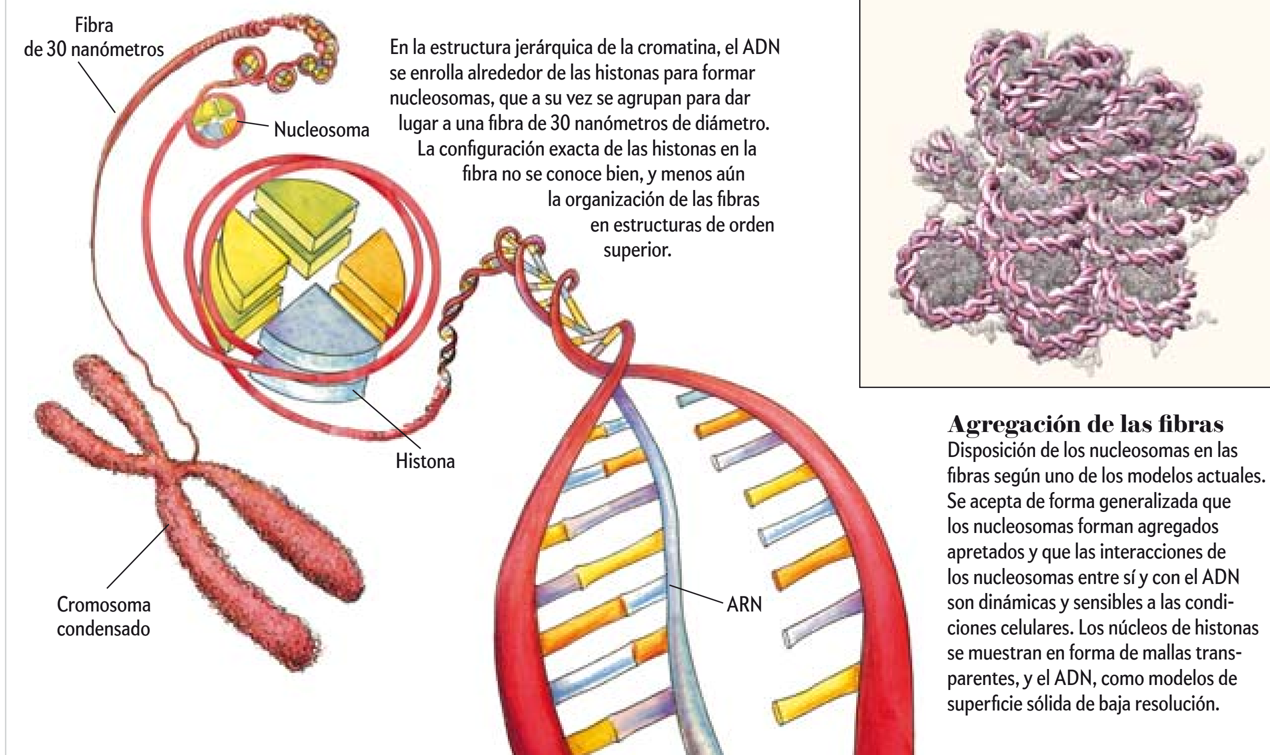
UNA VISIÓN MÁS CERCANA

Cada vez más se reconoce la influencia de la forma, estructura y propiedades de unión del ADN sobre la actividad génica. En 2009, el equipo de Remo Rohs, por entonces en la Universidad de Columbia, publicó un trabajo sobre las características biofísicas de las interacciones del ADN con las proteínas. Demostró que las secuencias de ADN con repeticiones cortas de adenina o timina poseían una estructura helicoidal más estrecha y más rígida. Cuando el ADN con repeticiones de adenina se deforma para plegarse, como en las interacciones entre ADN y proteínas que forman los nucleosomas, el estrechamiento del surco menor del ADN concentra un potencial electrostático que atrae al aminoácido arginina, de carga positiva. Esta atracción podría explicar el modo en que numerosos factores de transcripción ricos en arginina hallan el sitio de unión correcto sin necesidad de leer todas las bases de la secuencia. El grupo de Rohs demostró también que el posicionamiento de los nucleosomas en la secuencia de ADN se produce por el mismo mecanismo. Los estudios biofísicos basados en

SOCIEDAD AMERICANA DE FILOSOFÍA

Organización de la cromatina

Cada vez se aprecia más la necesidad de tener una visión completa de la estructura y función de la cromatina, el complejo de ADN y proteínas que forma los cromosomas. De gran importancia resulta la fina variabilidad química y espacial que confieren las curvas y los giros del ADN, que comprimen o amplían los surcos de la hélice y modulan la fuerza de las cargas electrostáticas que interaccionan a lo largo de la molécula.



En la estructura jerárquica de la cromatina, el ADN se enrolla alrededor de las histonas para formar nucleosomas, que a su vez se agrupan para dar lugar a una fibra de 30 nanómetros de diámetro. La configuración exacta de las histonas en la fibra no se conoce bien, y menos aún la organización de las fibras en estructuras de orden superior.

Agregación de las fibras
Disposición de los nucleosomas en las fibras según uno de los modelos actuales. Se acepta de forma generalizada que los nucleosomas forman agregados apretados y que las interacciones de los nucleosomas entre sí y con el ADN son dinámicas y sensibles a las condiciones celulares. Los núcleos de histonas se muestran en forma de mallas transparentes, y el ADN, como modelos de superficie sólida de baja resolución.

EMMA SKURNICK (*ilustración*), DANIELA RHODES (*inserto*)

la estructura fina del ADN merecen tanta atención como la que se dedica a la reciente revolución bioinformática, que hace hincapié en el análisis estadístico de las secuencias de ADN.

Hasta hace muy poco se pensaba que el nucleosoma correspondía a un simple empaquetamiento pasivo del ADN, cuya información podía almacenarse hasta el momento de necesitarse. Se suponía que los factores de transcripción desplazaban a los nucleosomas para acceder a los sitios de regulación del ADN. Durante muchos años, esta perspectiva limitó el estudio de la unión de los factores de transcripción, que se centraba en la identificación de las secuencias nucleotídicas de los sitios de unión, en lugar de examinar, desde un punto de vista biofísico, la preferencia de una proteína por una determinada secuencia. En la perspectiva actual, se destaca la importancia de las interacciones a escala nanométrica entre el ADN y las proteínas, lo que constituye la base de las redes reguladoras del genoma.

LA POSICIÓN DEL NUCLEOSOMA

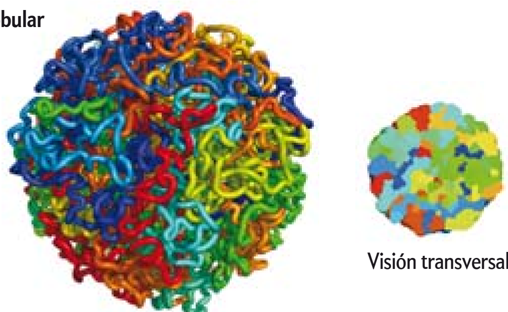
El ADN es una de las biomoléculas más rígidas; su forma helicoidal le confiere cierta consistencia, ya que las interacciones de los grupos cargados a lo largo de la espiral contribuyen a mantener a la molécula estirada. Los cálculos biofísicos indican que, bajo condiciones fisiológicas de *p*H y concentración salina, el genoma desenrollado no se desplomaría como si de un manojo de hilos de coser se tratara, sino que presentaría una forma voluminosa difusa, parecida a una maraña espesa de hilo de pescar. El volumen de esa masa superaría en cien veces al de la célula donde se alberga. En la mayoría de los grandes genomas, la solución biológica a este problema ha consistido en enrollar el ADN en apretados ovillos de nucleosomas.

El nucleosoma está formado por un octámero de dos pares de cuatro tipos de proteínas, las histonas (H2A, H2B, H3 y H4); unos 147 pares de bases de ADN envuelven dos veces el núcleo de ocho unidades de histonas. Karolin Luger determinó la estructura molecular del nucleosoma en 1997, en el Instituto de Biología Molecular y Biofísica de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich. Hasta entonces, otros investigadores habían concluido que las estructuras de cromatina de orden ligeramente superior estaban formadas por múltiples histonas; sin embargo, no se conocía la geometría precisa de la matriz que establecen las moléculas de ADN con los millones de histonas.

Mientras que la estructura primaria de la cromatina se halla definida por la posición de los nucleosomas en el ADN, el siguiente nivel de la estructura está probablemente determinado por las interacciones entre nucleosomas vecinos —interacciones a su vez controladas por la modificación química de la propia histona—. En particular, las histonas H3 y H4 poseen largas colas que interaccionan con las secuencias de ADN de la cara externa de los nucleosomas contiguos. La acetilación de ciertos aminoácidos de las colas de H3 y H4 promueve la disociación del nucleosoma, lo que permite el acceso de los factores de transcripción al ADN y la consiguiente activación de los genes. La metilación

Nivel de organización superior

¿Cómo se ordenan las fibras de cromatina en un nivel superior? Una serie de experimentos recientes han permitido desentrañar en parte esta incógnita. Las técnicas de captura de la conformación cromosómica, junto con simulaciones por ordenador, han dado lugar a un modelo estructural detallado de la cromatina, que se ha completado con una deducción sobre su plegamiento general.



Los nuevos métodos han permitido descartar la idea tradicional de que las fibras de cromatina adoptan una configuración desordenada, parecida a las disposición aleatoria de los espaguetis, conocida como equilibrio globular (*a*). Se ha comprobado que los cromosomas están formados por pliegues sobre pliegues, una estructura similar a la curva de Peano, un objeto matemático que ocupa los espacios con giros comprimidos. Se forman así glóbulos fractales, o glóbulos de glóbulos (*b*). De modo similar a las estanterías deslizantes, esa conformación permite acceder a los espacios entre glóbulos y confiere un mayor dinamismo a la cromatina (*c*).





de otros sitios se asocia a una estructura cerrada de la cromatina y a una inhibición de la actividad génica. Las modificaciones específicas de las regiones internas de las histonas producen variantes que influyen en la regulación génica.

Durante decenios se sabía que la interacción del ADN con el núcleo central del nucleosoma favorecía las secuencias periódicas de 10 a 11 pares de bases, pauta que facilitaba la torsión pronunciada del ADN alrededor del nucleosoma. Johnathon Widon, de la estadounidense Universidad Noroccidental, y Eran Segal, del Instituto Weizmann, realizaron en 2006 una serie de experimentos en los que se inducía la unión entre fragmentos de ADN y nucleosomas. Sus resultados les permitieron identificar las pautas de posicionamiento del nucleosoma en el ADN. Los investigadores observaron que en las secuencias que entran en contacto con la superficie del nucleosoma hay un motivo regular formado por tres tipos de dinucleótidos contiguos (AA, TT y TA).

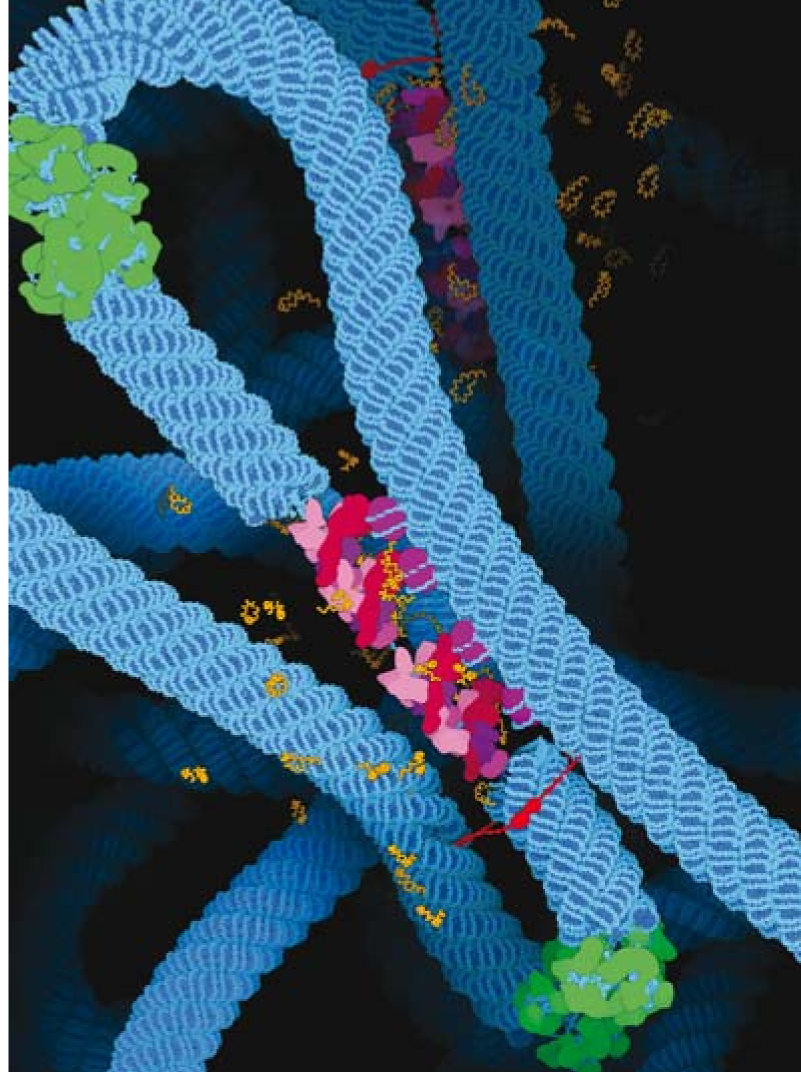
La periodicidad natural de 10,4 bases en la estructura helicoidal del ADN contribuye a la existencia de estos motivos de 10-11 pares de bases, lo que facilita el plegamiento del ADN sobre la superficie de la histona. Actualmente, los biofísicos exploran las fuerzas moleculares que actúan durante la formación del nucleosoma. Han desarrollado incluso modelos que predicen con bastante precisión las energías necesarias para que una secuencia se deforme sobre la superficie del nucleosoma. El trabajo demuestra que la formación del nucleosoma y su posicionamiento parece depender de los motivos de la secuencia del ADN, lo que sugiere que la secuencia en sí misma codifica su propio empaquetamiento en la cromatina.

EVOLUCIÓN DE LA CROMATINA

Como evolucionistas moleculares, ese hallazgo nos despertó especial interés a mi supervisor postdoctoral, Yuseob Kim, y a mí cuando trabajábamos en el Instituto de Biodiseño de la Universidad estatal de Arizona en colaboración con el biofísico Michael Tolstorukov, de la Escuela Médica de Harvard. El descubrimiento significaba que podíamos establecer con exactitud la acción directa de la selección natural sobre las secuencias del genoma relacionadas con la estructura de la cromatina. El hecho de que las características biofísicas de la estructura de la cromatina dependieran de la secuencia indicaba que la estructura en sí misma se hallaba expuesta a las fuerzas evolutivas. Se abría ante nosotros un nuevo campo de estudio: podríamos inferir la acción de la selección natural sobre los motivos de secuencia y desarrollar nuevos métodos estadísticos para determinar el efecto de los motivos en la estructura de la cromatina. Nuestros primeros análisis evolutivo-moleculares de la organización de la cromatina en un eucariota simple, la levadura *Saccharomyces,* se publicaron en 2008.

Los datos evolutivos que encerraba la cromatina podrían servir para deducir la formación de los nucleosomas en determinadas secuencias de ADN. En un principio intentamos establecer tal relación a partir del análisis de un gran número de fragmentos de ADN unidos a nucleosomas. En nuestro trabajo más reciente hemos realizado simulaciones informáticas sobre la energía de deformación necesaria para que una secuencia específica se adapte a la estructura molecular del nucleosoma. Hemos demostrado también la acción de la selección natural, que

LEONID MIRNY, DIVISIÓN HARVARD-MIT DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA SALUD (*a* y *b*)



Según el modelo actual de la expresión génica, las «fábricas de transcripción» son ensamblajes semipermanentes de proteínas que se forman sobre los genes activos en las regiones de ADN desempaquetadas. Actualmente se investiga hasta qué punto estos sitios están especificados por los mismos factores que determinan la unión de las fibras a las histonas.

HUA WONG/COMPUTATIONAL IMAGING & MODELING GROUP

favorecería la conservación de las secuencias que afectan al posicionamiento del nucleosoma en las regiones reguladoras de los genes. En trabajos posteriores hemos descubierto que los sitios de unión de muchos factores de transcripción en las levaduras presentarían un entorno, conservado a lo largo de la evolución, con una función importante en la dinámica espacial y temporal de la actividad génica.

NIVELES SUPERIORES DE ESTRUCTURA

La diferencia de tamaño entre la fibra formada por los nucleosomas agrupados y los enormes cromosomas condensados que se observan antes de la división celular es extraordinaria, de tres a cuatro órdenes de magnitud. Todavía sabemos muy poco acerca de los niveles de estructura presentes en los cromosomas condensados o en la cromatina distendida. ¿Se ordenan las fibras en bucles, o se hallan estas enrolladas como en una cuerda? Todavía no hay una respuesta clara al respecto, aunque una serie de experimentos recientes en diferentes laboratorios nos han acercado bastante a ella.

El grupo de Job Dekker, de la Universidad de Massachusetts, desarrolló en 2002 la técnica de captura de la conformación cromosómica o «3C». Se introduce formaldehído para que se formen enlaces cruzados entre regiones de ADN cercanas, bien de partes remotas del mismo cromosoma o de diferentes cromosomas. Tras digerir el ADN en fragmentos, se recuperan y se analizan las piezas ligadas, con lo que se obtiene información sobre el modo en que se pliegan regiones concretas del genoma.

La siguiente innovación consistió en formar círculos a partir de los fragmentos recuperados de ADN y añadirles cebadores, proceso que facilitaba la amplificación y el análisis posterior. El 3C circular, llamado 4C, dio paso a la nueva técnica 5C del laboratorio de Dekker: la copia en carbón de la técnica 3C, que añade el análisis masivo paralelo a la amplificación. Este método mejorado permite identificar todas las regiones que se hallan muy próximas entre sí y brinda una instantánea muy detallada del plegamiento global del genoma.

Al incorporar las herramientas de secuenciación de nueva generación, el laboratorio de Dekker, en colaboración con Eric Lander, del Instituto Broad de Harvard y del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), desarrollaron la técnica Hi-C: antes de producir los enlaces cruzados del ADN, se añaden marcadores que permiten crear un mapa de las regiones de contacto en todo el genoma. El análisis del mapa de interacciones, mediante la teoría del polímero y simulaciones por ordenador, revela mucha información sobre el plegamiento de los 2 metros de ADN dentro del núcleo, de 5 micrómetros de tamaño. El análisis de probabilidades reveló la mayor interacción entre regiones ricas en genes de distintos cromosomas. Los datos obtenidos por Hi-C indican también la existencia de dos «compartimentos» diferentes, uno más compacto y otro más distendido; este último probablemente corresponde a la cromatina que se transcribe activamente.

Un análisis más detallado, realizado en colaboración con el laboratorio de biofísica de Leonid Mirny, de la División Harvard-MIT de Ciencias y Tecnología de la Salud, evaluó las probabilidades de contacto entre pares de loci separados por distancias genómicas diversas. A partir del modelo estadístico emergente se desarrolló, mediante simulaciones por ordenador, un modelo estructural detallado que se completó con una deducción del estado general de plegamiento. El mapa resultante de contactos varía en función del empaquetamiento considerado de la cromatina. Este puede ser aleatorio, como ocurre con los espaguetis, en cuyo caso se habla de equilibrio globular; o bien formar una serie de curvas comprimidas, con pequeñas extensiones que originan glóbulos que colindan a su vez con otros para formar glóbulos de glóbulos, y así hasta alcanzar los niveles superiores de organización, un estado polimérico denominado glóbulo fractal. El grupo de Alexander propuso tal estructura hace 20 años. Las simulaciones por ordenador basadas en datos de Hi-C confirman esa organización. Además, indican que la ausencia de enredos y la jerarquía de los glóbulos conferirían dinamismo a la cromatina, que se desplegaría fácilmente y permitiría el acceso a las regiones interiores, de modo parecido al funcionamiento de las estanterías deslizantes.

EVOLUCIÓN DE LA REGULACIÓN GÉNICA

La evolución molecular de la secuencia puede clasificarse como estructural o reguladora, según su efecto. La evolución estructural se refiere a las mutaciones del ADN que modifican la estructura de la proteína. Los cambios se producen solo en las regiones codificantes del ADN. Por lo general, las mutaciones en la tercera base de los codones (las palabras de tres letras que codifican un aminoácido) no alteran la secuencia de la proteína; son silenciosas o imperceptibles. Sin embargo, las mutacio-





Uno de los factores influyentes en el desarrollo de los organismos es la variabilidad. En la transición del genotipo al fenotipo puede existir un notable ruido estocástico: lo innato y lo adquirido se unen al azar cuando un gen inducible responde a un entorno fluctuante. Al comparar la simetría facial de este áfido (*arriba*) y de la mosca de la fruta (*abajo*) se observan distintos grados de robustez reguladora y de compensación frente a la influencia del ambiente.

CORTESÍA DE GREGORY A. BABBITT (*arriba*); EYE OF SCIENCE/PHOTO RESEARCHERS, INC. (*abajo*)

nes en las otras posiciones del codón no son silenciosas. Los evolucionistas moleculares emplean esta característica del código genético para deducir la acción de la selección natural sobre la evolución estructural de las proteínas. Simplemente, observan la proporción de mutaciones silenciosas y no silenciosas y la comparan con la proporción que se obtendría si la selección hubiera sido neutral. Examinar la acción de la selección natural en regiones no codificantes representa una tarea más ardua, ya que el ADN no codificante carece de marcadores como la tercera posición del codón.

La capacidad reguladora de las secuencias depende en última instancia de su capacidad de adaptación física a los sitios de unión de los factores de transcripción que modulan la expresión génica. La biofísica de estas interacciones se opone a las fuerzas biofísicas que controlan la formación del nucleosoma; es decir, los factores de transcripción rivalizan con el nucleosoma para acceder a estas secuencias de ADN. Si bien esta competencia parece asignarle una función represiva a la cromatina, se ha observado que algunos nucleosomas se posicionan estratégicamente para ayudar a configurar los sitios de unión y hacerlos así más reconocibles para los factores de transcripción. Algunos estudios recientes han demostrado que todos los genes están flanqueados por regiones sin nucleosomas, más rígidas que la mayoría y con mayor dificultad de enrollarse alrededor del nucleosoma. Esas secuencias se sitúan a ambos lados de las regiones codificantes y favorecen el acceso de los factores de transcripción. De hecho, esas regiones podrían formar parte de las «fábricas de transcripción», según un nuevo modelo; podrían desplegarse sobre genes activados o migrar hacia ellos para transcribirlos.

En el futuro, los métodos para inferir la evolución molecular de los sitios reguladores deberán abordar las complejas interacciones moleculares existentes, lo que se podrá conseguir con la ayuda de modelos estadísticos y biofísicos. Podremos entonces explorar las regiones reguladoras de ADN no codificante, la «materia oscura» del genoma humano, con las mismas técnicas que cuantifican su organización funcional básica: las propiedades biofísicas que determinan si un polímero de ADN se puede adaptar a la estructura del nucleosoma y controlar así el acceso a la información que contiene esa secuencia.

INFLUENCIA DEL AMBIENTE

En la mayoría de los organismos multicelulares, el desarrollo depende de la sincronización y del control preciso de la expresión génica. Muchos de los genes fundamentales del desarrollo se activan solo en el embrión, en un lugar y momento concretos. Hasta ahora, la mayoría de los estudios sobre la evolución de la regulación génica se han centrado en el control molecular de las pautas de desarrollo de los planes corporales, el campo de la evolución del desarrollo («evo-devo», por su versión en inglés).

Una vez alcanzado cierto estadio de desarrollo, la función más importante de la regulación génica es facilitar la inducción de ciertos tipos de genes en respuesta a las condiciones ambientales. Gran parte del desarrollo animal inicial se produce en ambientes protegidos, como el útero o el huevo. El crecimiento y el desarrollo tardío, en cambio, son más sensibles a las condiciones externas, y pueden verse afectados por la salud y nutrición de la madre o el estrés ambiental.

Los fenotipos complejos (es decir, las características morfológicas o fisiológicas) representan el producto de la interacción de numerosos genes que se activan en un ambiente concreto durante el desarrollo. Esa interacción génico-ambiental se combina con un nivel sorprendente de ruido biomolecular aleatorio. Los biólogos del desarrollo que asocian genotipos a fenotipos deben tener en cuenta que no siempre se puede separar por completo el efecto de la herencia, el ambiente y el azar en el desarrollo de un fenotipo. Si se les preguntara dónde ocurren esas interacciones en la célula, la respuesta sería que en la cromatina. En su nivel más primario, la formación del nucleosoma depende de la secuencia; por lo tanto, se hereda. En abril de 2010, el grupo de Ryan McDaniell publicó un artículo en *Science* donde describía huellas específicas de alelo en la cromatina humana que pueden heredarse. El equipo de Shahaf Pe-

leg publicó un mes después en la misma revista la relación existente entre las modificaciones en la cromatina (acetilación alterada de las histonas) y la pérdida de la memoria asociada a la edad en los ratones.

Esos estudios demostraron que la cromatina presenta una gran estabilidad y, por tanto, heredabilidad y permanencia en la escala de tiempo evolutivo. Pero también posee un notable dinamismo por hallarse sujeta a cambios ambientales. Esa doble propiedad hace de la cromatina la interfaz primaria donde interaccionan genes y ambiente. Constituye el lugar más evidente donde investigar la evolución de la regulación génica.

Pero ¿cómo consigue la cromatina esa doble función a escala molecular? Dado que la ultraestructura de la cromatina, definida por la posición del nucleosoma en el ADN, depende en última instancia de la composición y configuración espacial de las secuencias nucleotídicas, los rasgos de la cromatina heredables y con posibilidad de evolucionar tal vez presenten una interacción física directa con el ADN. Sin embargo, ya que la cromatina puede experimentar alteraciones reversibles en niveles superiores de organización estructural, como las modificaciones químicas de las colas de histonas, el componente no heredable y dinámico de la cromatina probablemente se asocie a niveles superiores de organización, en una escala molecular más alejada de la influencia biofísica directa de las secuencias de ADN. En última instancia, la compleja dualidad de la cromatina se debe a su calidad jerárquica, cuasi estable y organizada en capas. Así, mientras que las investigaciones de los últimos años han demostrado que en el nivel primario del nucleosoma el ADN codifica su propio empaquetamiento, también han revelado que la estructura de la cromatina en niveles superiores es más plástica, y se halla sujeta a los cambios ambientales a lo largo de la vida y al efecto del envejecimiento.

En los últimos años, las investigaciones sobre la biología de la cromatina han experimentado un gran auge. El nuevo campo interdisciplinario de la epigenética, que abarca cualquier cambio heredable del fenotipo o de la expresión génica no causado directamente por cambios en el ADN, recibe una importante financiación de los Institutos Nacionales de la Salud de EE.UU. Pronto se finalizará la cartografía de las posiciones del nucleosoma en el epigenoma humano.

Pero esas tareas modernas tienen sus raíces en un tiempo pasado, cuando los biólogos no habían redescubierto aún las leyes de Mendel ni se conocía el concepto moderno de gen. Destacamos de nuevo aquí la figura de Edmund Beecher Wilson, quien escribió sobre la importancia de la función y evolución de la cromatina, y estableció el puente entre el genotipo y el fenotipo de los individuos. En su tiempo ya vislumbró la dificultad que representaba conocer el origen del «ajuste» coordinado en la cromatina, la fuerza del equilibrio entre las relaciones externas e internas que domina cada manifestación de la vida. La naturaleza y el origen de esa fuerza constituyen el problema fundamental de la biología.

© American Scientist Magazine

PARA SABER MÁS

Inferring natural selection on fine-scale chromatin organization in yeast. G. A. Babbitt e Y. Kim en *Molecular Biology and Evolution*, vol. 25, n.o 8, págs. 1714-1727, 2008.

The role of DNA shape in protein-DNA interaction. R. Rohs et al. en *Nature*, vol. 461, págs. 1248-1254, 2009.

Heritable individual-specific and allele-specific chromatin signatures in humans. R. McDaniell et al. en *Science*, vol. 328, págs. 235-239, 2010.

The role of nucleosome positioning in the evolution of gene regulation. A. M. Tsankov et al. en *PLOS Biology*, vol. 8, n.o 7, pág. e1000414, 2010.

Chromatin higher-order structure and dynamics. C. L. Woodcock y R. P. Ghosh en *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, vol. 2, pág. a000596, 2010.

2011 AÑO INTERNACIONAL DE LA QUÍMICA

Las cuestiones sobre la estructura y la transformación de la materia subyacen bajo los mayores retos científicos de la humanidad. La química es, por ello, una de las ciencias más transversales y con mayor impacto en nuestra sociedad.



Año Internacional de la
QUÍMICA
2011

Con motivo del Año Internacional de la Química, Investigación y Ciencia regala cada mes, durante todo el 2011, artículos relacionados con el desarrollo y las aplicaciones de la química.

Este mes:

MATERIALES
Radiaciones ionizantes, por Guillem Cortés Rossell

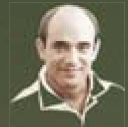
TALLER Y LABORATORIO
Miscelánea electroquímica, por Marc Boada

Descárgalos gratis en nuestra web
www.investigacionyciencia.es



Nuevos descubrimientos demuestran la regulación molecular del proceso de la floración, fenómeno que ha fascinado desde hace tiempo a numerosos científicos.

Miguel Ángel Blázquez es investigador del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en el Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas Primo Yúfera de Valencia. Su interés se centra en el papel de las hormonas en el desarrollo de las plantas.



Manuel Piñeiro es investigador titular del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias en el Centro de Biotecnología y Genómica de Plantas de Madrid. Su trabajo está enfocado a comprender el modo en que la reorganización de la cromatina modula el desarrollo vegetal.



Federico Valverde es científico titular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en el Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis de Sevilla (CSIC-Universidad de Sevilla). Desarrolla su investigación sobre las bases bioquímicas de la floración por fotoperíodo en plantas modelo y de interés agroalimentario.



BIOLOGÍA VEGETAL

Bases moleculares de la floración

Investigaciones recientes desvelan una imbricada red de señales moleculares que optimiza el tiempo de floración y asegura el éxito reproductivo de las plantas

Miguel Ángel Blázquez, Manuel Piñeiro y Federico Valverde

La floración es un proceso que ha despertado fascinación desde tiempos remotos. Conocer el momento en que florecen las plantas de cultivo resultó crucial en la antigüedad para optimizar la recolección de frutos y semillas, y hoy sigue siendo un carácter primordial para la mejora de la producción agrícola. Los humanos han alterado con frecuencia la floración de especies cultivadas. En ocasiones, las plantas han debido adaptarse a un ciclo de vida diferente al de su zona geográfica de procedencia, como sucedió durante la aclimatación de los cultivos americanos tras su introducción en Europa. Otras veces se ha buscado que la floración fuera permanente, como en la coliflor, un mutante de la col con una inflorescencia perpetua, o bien se ha intentado retrasarla indefinidamente, algo que constituye la piedra filosofal de la investigación en hierbas forrajeras.

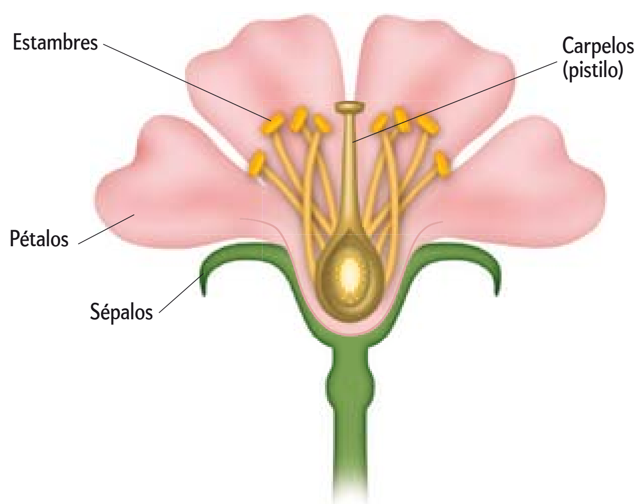
La floración conlleva en la planta el cambio de un programa de desarrollo por otro. Cuando un meristemo vegetativo (agrupación de células no diferenciadas que se dividen activamente y originan hojas y ramificaciones) recibe una determinada señal, su programa de desarrollo se ve alterado y se convierte en un meristemo reproductivo que da lugar a flores. Esta idea ya la recogió el poeta alemán Goethe en el siglo xviii cuando se refería a las flores como «hojas modificadas», pero ha sido gracias al moderno estudio de mutantes florales de las plantas *Arabidopsis thaliana* y *Antirrhinum majus* cuando se ha establecido el modelo ABC del desarrollo floral, un paradigma de la

EN SÍNTESIS

La floración es un proceso complejo que ha fascinado desde tiempos remotos a científicos y pensadores, pero solo desde hace veinte años se han empezado a determinar las bases moleculares que rigen este fenómeno.

Las plantas han adaptado una complicada red de señalización molecular que les sirve para percibir las condiciones ambientales (sobre todo, luz y temperatura) y decidir el mejor momento del año para florecer.

Se presentan los últimos conocimientos sobre el modo en que las plantas memorizan el paso del invierno, identifican la estación según la longitud del día e integran señales internas para producir el florígeno. Esta sustancia se genera en las hojas y se desplaza por los haces vasculares hasta los ápices, donde desencadena la formación de las flores. La plasticidad de la floración se refleja, a nivel molecular, en la integración de los cambios ambientales.



El botón floral se divide en cuatro regiones concéntricas, o verticilos, que coinciden con las células que darán lugar a sépalos, pétalos, estambres y carpelos (pistilo). La diferenciación de estas células en verticilos se debe a la acción individual o conjunta de varios genes que forman los grupos A, B y C.

biología del desarrollo. Según este modelo, los diferentes verticilos florales, es decir, los anillos concéntricos en los que se disponen los órganos florales que forman la flor madura (de fuera a dentro, sépalos, pétalos, estambres y carpelos) están determinados por la acción combinada de tres clases de genes reguladores: los de clase A dirigen la formación de sépalos en el primer verticilo, mientras que estos y los de clase B juntos promueven el crecimiento de pétalos; la combinación de los genes de clase B y C conlleva el desarrollo de estambres, y los de clase C solos, carpelos en la región central de la flor.

Sin embargo, la decisión de iniciar la floración depende de la activación de muy pocos genes, denominados integradores florales. Estos actúan como interruptores que, al encenderse, desencadenan la transición floral y ponen en marcha el programa ABC de desarrollo. Toda la información necesaria para determinar el momento de la floración tiene como objetivo controlar a estos interruptores, algo que consiguen las distintas señales ambientales y endógenas.

EL MOMENTO ÓPTIMO PARA FLORECER

Dado el carácter sésil de las plantas, que la floración suceda en un momento determinado del año resulta crucial para que la producción de semillas tenga lugar en las condiciones ambientales óptimas, de manera que se garantice el éxito reproductivo. No es de extrañar, pues, que las plantas con flor (angiospermas) hayan desarrollado la capacidad de percibir señales externas y de controlar de forma muy precisa el momento de inicio de su desarrollo reproductivo. La ventaja evolutiva que representa el reconocimiento del paso de las estaciones ha impulsado la adquisición de mecanismos moleculares que permitan identificar factores ambientales, como los cambios cíclicos a lo largo del año en la temperatura y la duración relativa de los días y las noches (fotoperíodo). Así, un aumento progresivo de la duración de los días y de la temperatura tras un período prolongado de frío constituye una señal inequívoca de que se avecina la primavera, una estación favorable para muchas plantas. Si el estado de madurez de la planta y la disponibilidad de nutrientes son además los adecuados, las condiciones idóneas para florecer están servidas.

El empleo de especies modelo como *Arabidopsis thaliana* y el progreso reciente de técnicas de biología molecular, a los que se están agregando con dinamismo otras nuevas tendencias en biología, como la genómica y la proteómica, han permitido desvelar algunos de los circuitos génicos que controlan el momento del inicio de la floración.

RECONOCER LA DURACIÓN DE LOS DÍAS

Que las plantas florezcan en una determinada época del año no asombra a nadie, pero sí su capacidad de identificar la longitud del día y la calidad de la luz, muy superior a la de cualquier animal. Lo consiguen gracias a una dotación de detectores de luz sin parangón en el resto de los organismos, los fotorreceptores vegetales, y a un reloj celular autónomo que marca períodos de 24 horas y permite que cada célula se anticipe a los ciclos de luz y oscuridad. Reloj y fotorreceptores forman una combinación ideal para detectar la longitud del día, reconocer el momento del año en que la planta se encuentra y decidir el mejor momento para florecer.

Los animales, incluidos los humanos, poseemos un reloj circadiano (por *circa*, «cerca de», y *dies*, «día») de 24 horas, centralizado en el cerebro, en la glándula pineal, y regulado por hormonas como la melatonina. Este reloj interno se encarga de que nuestro tono muscular caiga durante la noche y se estimule por la mañana, incluso antes de despertarnos. Su desajuste puede alterar los ritmos corporales, como cuando nos desplazamos a zonas con un desfase horario generalmente superior a las cuatro horas (*jet lag*).

En las plantas, dado que su principal fuente de energía procede del sol, anticipar el amanecer y prepararse para recibir la energía solar ha aportado una importante ventaja a lo largo de la evolución. De ahí que desde la existencia de las primeras bacterias con fotosíntesis, las cianobacterias, el reloj circadiano regule numerosos procesos relacionados con la obtención de energía y el desarrollo vegetal. Desde mediados del siglo pasado se sabe que el ritmo circadiano influye también sobre la floración, tras observar que plantas habituadas a un fotoperíodo de pocas horas de luz seguían floreciendo rítmicamente cuando se desplazaban a otra zona con fotoperíodo cambiado. Según la repuesta al fotoperíodo, las plantas se clasifican como de día largo (si florecen cuando los días se alargan) o de día corto (si lo hacen cuando los días se acortan). Ejemplos de plantas de día largo son el tabaco y el rábano, mientras que el arroz o el árbol de Pascua representan plantas de día corto. Algunas plantas, como la patata o el pepino, suelen mostrarse insensibles al fotoperíodo y no dependen de un ciclo determinado de luz/oscuridad para florecer.

Arabidopsis thaliana, la especie utilizada como modelo, es una planta facultativa de día largo, esto es, aunque florezca principalmente en día largo también puede hacerlo en día corto. Se ha observado que varias mutaciones en la respuesta fotoperiódica de *Arabidopsis* se deben a alteraciones en los fotorreceptores. La inactivación del criptocromo 2 provoca un retraso floral en día largo, por lo que debe ser un inductor floral; la desaparición del fitocromo B, en cambio, acelera la floración, acción propia de un represor floral. Sobre la función de los fotorreceptores en el desarrollo hay una excelente revisión en la presente publicación [*véase* «Fitocromos y desarrollo vegetal», por J. F. Martínez et al; Investigación y Ciencia, febrero de 2002].

De entre todas las mutaciones que alteran la floración en *Arabidopsis*, la que afecta al gen *CONSTANS* (*CO*) resulta particularmente sorprendente porque torna la planta insensible al foto-

PÁGINAS PRECEDENTES: MARTIN HIRTREITER, CREATIVE COMMONS 3.0 UNPORTED: *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA (esquema flor)*

período. La identificación del gen *CO* ha desvelado que codifica una proteína nueva (la proteína CO) exclusiva de vegetales, algunos de cuyos dominios proteicos guardan similitud con activadores de la transcripción génica en animales. Estudios de hibridación de ARN en micromatrices han mostrado que la expresión de *CO* induce a su vez la activación de un gran número de genes, entre ellos los integradores florales *FLOWERING LOCUS T* (*FT*) y *SUPPRESSOR OF OVEREXPRESSION OF CONSTANS 1* (*SOC1*). Además, la expresión de *CO* depende del ritmo circadiano, de manera que la producción de su ARN mensajero difiere entre un día largo y un día corto: durante un día largo, parte de la expresión de *CO* coincide con el período de luz, particularmente al final de la tarde, mientras que en un día corto el pico de expresión de *CO* se halla en la fase nocturna.

Gracias a observaciones previas sobre la señal floral, algunas de más de un siglo de antigüedad, diversos grupos, entre ellos el de Steve Kay, del Instituto de Investigación Scripps de California, han postulado el modelo de la «coincidencia externa» como el que mejor explica la floración por fotoperíodo. Según este modelo, la coincidencia de un ritmo interno, que determina el cambio cada 24 horas de una señal interna, con una señal procedente del exterior desencadena la señal reproductiva. Esta conjunción se produce solo en el momento propicio del año con una duración del día adecuada.

Se sabía que el ritmo interno lo marcaba la regulación circadiana del ARNm de *CO*, pero la señal externa era desconocida. Mediante una serie de experimentos con diferentes mutantes de fotorreceptores y luces de un solo color (monocromáticas) se ha demostrado que la estabilidad y actividad de la proteína CO depende de una señal luminosa procedente de la cascada de señales de diferentes fotorreceptores. De esta manera, los receptores de luz azul (positivos) como el criptocromo 2 estabilizan CO, mientras que los fotorreceptores de luz roja (negativos) como el fitocromo B desestabilizan la proteína y modulan su degradación por el proteasoma (maquinaria celular encargada de marcar proteínas para su degradación). Así, la estabilidad y activación de la proteína CO mediada por los receptores positivos, que se imponen a la acción represora de los fotorreceptores negativos en la tarde de un día largo (como sucede a finales de primavera), constituyen la señal externa.

Al coincidir esta con la señal interna del ARNm del gen *CO* se desencadena la expresión de *FT*, un gen que codifica un potente activador de la floración en angiospermas. Este modelo de la coincidencia externa basado en el gen *CO* es el más aceptado en la actualidad para explicar la inducción de la floración por fotoperíodo.

La señal fotoperiódica puede ser evolutivamente tan antigua como los propios vegetales, ya que hace poco se ha descubierto una proteína semejante a CO en algas unicelulares, en las que controla procesos tan fundamentales como la acumulación de almidón o el ciclo celular. Sorprendentemente, se ha observado en experimentos que si esta proteína se expresa en plantas superiores promueve en ellas la floración temprana y reproduce el efecto de CO. Ello indica que el mecanismo molecular básico de la respuesta fotoperiódica está evolutivamente muy conservado y que las proteínas de la familia CO podrían hallarse implicadas en la regulación fotoperiódica de procesos fisiológicos básicos.

¿HA PASADO YA EL INVIERNO?

En numerosas especies vegetales el inicio de la floración depende de que la planta haya estado previamente expuesta a un período prolongado de frío. Esta capacidad para percibir y, de alguna manera, recordar que la estación fría ya ha pasado, tiene un gran valor adaptativo en las plantas de climas templados, ya que les permite asegurarse de que la floración tenga lugar una vez superado el frío invernal. El fenómeno por el que las plantas inician o aceleran la floración tras una exposición prolongada a bajas temperaturas se conoce como vernalización. El transcurso de un período frío no induce la floración inmediata, sino que confiere a las plantas la «competencia» para florecer cuando el resto de las condiciones ambientales y endógenas sean las adecuadas. En el caso de especies anuales o bianuales, una vez que ha sido vernalizada, la planta mantiene el «recuerdo» del invierno pasado, que solo se pierde en la siguiente generación. Este fenómeno, que podría considerarse una forma de memoria vegetal, ha atraído el interés de los científicos durante decenios. En especies perennes, donde el proceso de vernalización apenas ha sido estudiado hasta el momento, este recuerdo ha de borrarse cada año para permitir un nuevo ciclo de floración.

Distintas especies y variedades vegetales muestran diferentes requisitos de exposición al frío antes de florecer. Algunas plantas herbáceas no florecen a menos que se sometan a un período frío prolongado, es decir, su requerimiento de vernalización es absoluto. Suelen ser plantas bianuales, como la remolacha azucarera. Otras, en cambio, aceleran su floración en respuesta al frío pero este no es estrictamente necesario para que florezcan. Son las variedades anuales de invierno, entre ellas



JOHAN N/WIKIMEDIA COMMONS

La decisión irreversible de florecer depende de una cascada de reacciones moleculares que llevan a la activación de los integradores florales, genes que ponen en marcha el desarrollo de la flor. *Antirrhinum majus* es una de las especies que ha servido para esclarecer el modelo de desarrollo floral en las plantas.

numerosos cereales de consumo humano. Típicamente, las semillas de estas plantas germinan en otoño, se mantienen en estado vegetativo durante el invierno y florecen en primavera. Finalmente, hay las variedades anuales de primavera, que no responden a la exposición al frío, sus semillas germinan en primavera y completan su ciclo vital antes de la llegada del invierno. A menudo coexisten en una especie variedades con distintas exigencias de vernalización. En ellas se han podido identificar unos pocos genes que establecen el requerimiento de vernalización. En la especie modelo *Arabidopsis thaliana*, dos de esos genes determinan la respuesta ante la vernalización y su comportamiento como planta anual de invierno; se trata de versiones funcionales o activas de los genes *FRIGIDA* (*FRI*) y *FLOWERING LOCUS C* (*FLC*). Por el contrario, las variedades con estos genes inactivos se comportan como anuales de primavera que no responden a la vernalización.

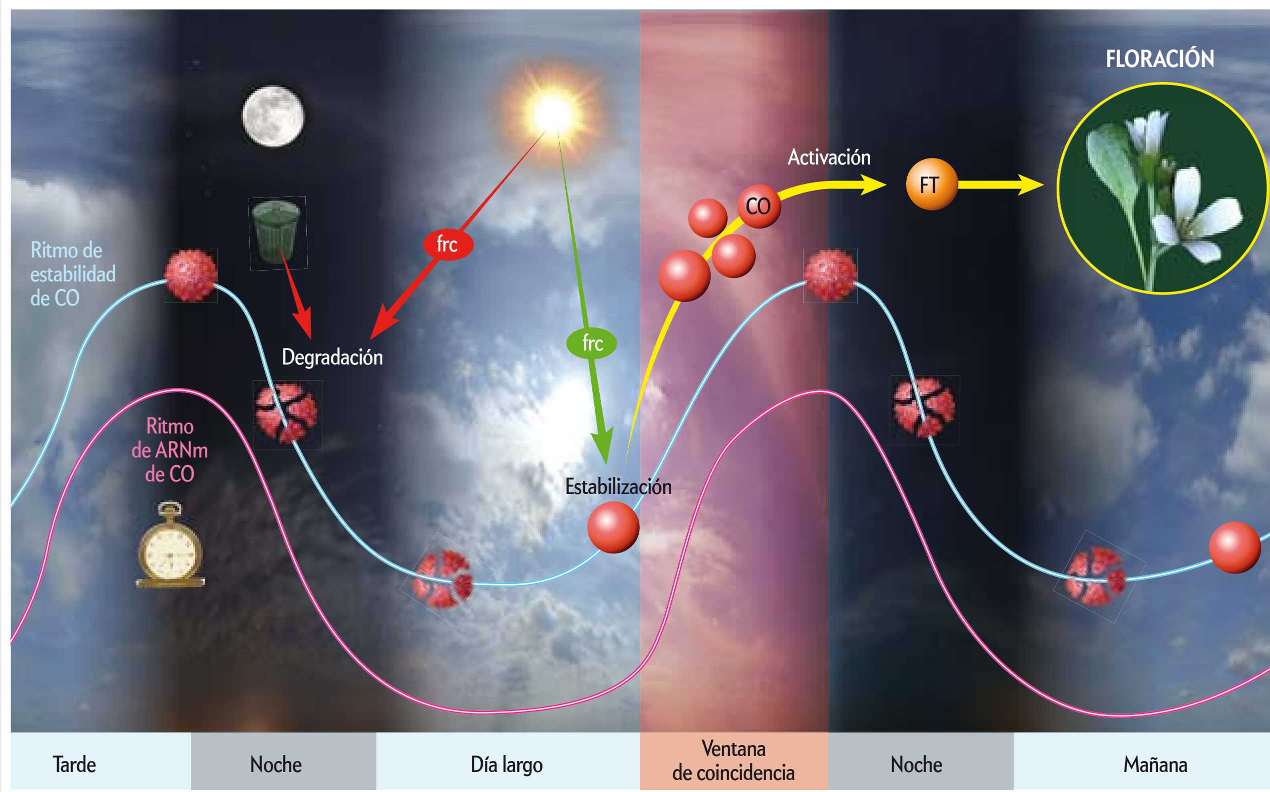
La base molecular del proceso por el que las plantas mantienen el recuerdo del invierno anterior ha permanecido oculta durante años. Ahora sabemos que el gen *FLC* de *Arabidopsis thaliana* codifica un factor de transcripción que actúa como un potente represor de la floración. En esta especie, la presencia de variantes activas del gen *FRI* aumenta la expresión de *FLC* hasta tal grado que hace retrasar el inicio de la floración. La exposición prolongada a bajas temperaturas provoca una disminución progresiva de los niveles de *FLC* y, por consiguiente, una aceleración de la floración. Las células del meristemo que dan lugar, división tras división, a todos los órganos aéreos de la planta son las que deben ser expuestas al frío para que este tejido adquiera la capacidad de responder a las señales de inicio de la floración.

La inactivación de *FLC* causada por un largo período de frío se mantiene estable una vez concluido el invierno, cuando la temperatura ambiental empieza a aumentar. Las células que percibieron el frío durante el invierno no darán lugar a la formación de flores, sino sus células hijas, en las que el gen *FLC* se ha mantenido silenciado a lo largo de sucesivas divisiones ce-

INFLUENCIA DEL FOTOPERÍODO

Percibir la longitud del día

La duración del día influye sobre la floración. En el proceso intervienen dos proteínas fundamentales: CO (*círculos rojos*) y FT (*círculo naranja*). Según el modelo más aceptado en la actualidad para explicar la floración dependiente del fotoperíodo, la coincidencia de un ritmo interno, creado por la expresión rítmica de CO, con una señal luminosa externa desencadena la floración. El ritmo de activación-degradación de CO se consigue mediante un control fino de la expresión de su ARNm (*línea magenta*) y de la estabilidad de la proteína (*línea azul claro*). Confluyen señales procedentes del ritmo circadiano (*reloj*), la acción de los fotorreceptores (*frc*), sea esta positiva (*verde*) o negativa (*rojo*), y la intervención del proteasoma (*cubo de basura*), que degrada CO en función del ciclo diario. El ARNm solo se sintetiza durante la noche y al final de la tarde. A más ARNm, más cantidad de proteína CO se produce. Sin embargo, esta proteína solo permanece estable si hay luz. En condiciones de oscuridad es degradada por el proteasoma. En la ventana marcada, que podría ser una tarde de primavera-verano, coincide el pico máximo de cantidad del ARNm de CO con la máxima estabilidad de la proteína, lo que lleva a su activación y la creación de la señal móvil en las hojas (FT) que desencadena la señal floral.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA SEGÚN M. Á. BLÁZQUEZ, M. PINEIRO Y F. VALVERDE

Después de una exposición prolongada al frío, como sucede en invierno, se acelera la floración de plantas de la familia Brassicacea, parientes cercanos de la especie modelo *Arabidopsis thaliana*. Las plantas expuestas a bajas temperaturas (*abajo*) florecen antes que aquellas que no han sido vernalizadas (*arriba*).





«EPIGENETIC REGULATION IN THE CONTROL OF FLOWERING», POR MYLNE ET AL. EN *COLD SPRING HARBOR SYMPOSIA ON QUANTITATIVE BIOLOGY LXIX*, 2004

lulares. Ello hizo pensar durante años que este proceso estaría mediado por mecanismos epigenéticos. Los factores epigenéticos son aquellos que modifican la expresión de un gen sin alterar la secuencia de su ADN y, además, se mantienen estables a lo largo de sucesivas divisiones celulares, lo que podría explicar la inactivación permanente del gen *FLC*. Estos factores no solo afectan a la estructura de la cromatina, esto es, la organización espacial del ADN alrededor de las histonas. Mediante maquinarias enzimáticas celulares, también modifican químicamente el ADN y las histonas, y contribuyen a determinar si una región del genoma se expresa o se silencia. La combinación de modificaciones presentes en la cromatina de una región del ADN (*locus*) determinada se conoce como el «código de histonas» y resulta esencial para determinar el estado de actividad transcripcional de ese *locus*.

El trabajo de diversos grupos de investigación, entre los que destacan el de Caroline Dean, del centro John Innes de Norwich, y el de Rick Amasino, en la Universidad de Wisconsin, ha demostrado que los procesos de reorganización de la cromatina son esenciales para la respuesta de vernalización en *Arabidopsis*. Durante la exposición al frío, las histonas presentes en la cromatina de la región de *FLC* van sufriendo modificaciones progresivas que acaban silenciando la expresión de ese gen.

Además, se han identificado diversas proteínas necesarias para la respuesta de vernalización. Entre ellas se encuentra VERNALIZATION 2 (VRN2), una proteína homóloga a factores del grupo Polycomb (PcG) previamente identificados en *Drosophila melanogaster* (la mosca del vinagre), y que funcionan como represores transcripcionales al modificar la organización de la cromatina. En plantas mutantes de *Arabidopsis* con proteínas VRN2 no funcionales se producen errores en el código de histonas, el encargado de apagar la expresión del gen *FLC* tras la exposición de las plantas al frío; como consecuencia, las plantas no pueden responder a la vernalización. VERNALIZATION INDEPENDENT 3 (VIN3) es otra proteína implicada en la respuesta de vernalización en *Arabidopsis*. La expresión de VIN3 se induce tras la exposición prolongada de las plantas a bajas temperaturas. Al igual que VRN2, VIN3 también actúa mediante la reorganización de la estructura de la cromatina del gen *FLC*. Estos estudios han puesto de manifiesto la importancia de las modificaciones de la cromatina para inhibir la expresión de *FLC* en respuesta al frío. La cromatina de ese *locus* adquiere una conformación inactiva e «imprime» en la memoria de la planta el recuerdo del frío invernal. La proteína FLC impide la activación de los genes integradores florales *FT* y *SOC1*, que inducen el inicio de la floración. De ahí que el interruptor epigenético que silencia la expresión de *FLC* tras el paso de la estación fría facilite la activación de los integradores florales, con lo que la planta adquiere la capacidad de florecer.

Al igual que en *Arabidopsis*, en otras especies que responden a la vernalización, como algunos cereales o la remolacha, el frío actúa inactivando un represor floral; sin embargo, los genes implicados en la vernalización no son homólogos a los de *Arabidopsis*. Si bien empezamos a entender los mecanismos moleculares que permiten a las plantas florecer una vez ha pasado el invierno, muchas cuestiones permanecen todavía sin resolver, entre ellas una de gran trascendencia: la naturaleza del sensor que percibe las bajas temperaturas y el canal que transmite esta señal hasta las regiones reguladoras de los genes que controlan el inicio de la floración.

COMBINACIÓN IDÓNEA DE LUZ Y TEMPERATURA

Como hemos indicado anteriormente, el paso del invierno y la llegada de la primavera van acompañados de un alargamiento de los días. Pero también se producen aumentos paulatinos en la temperatura media diaria, y las plantas han desarrollado un sistema para percibirlos. Prueba de ello es que *Arabidopsis*, igual que otras plantas de climas templados, florece más temprano si la temperatura ambiente asciende dentro de unos límites (entre unos 12 y 29 grados centígrados). De hecho, un aumento importante de la temperatura elimina a veces la necesidad de otros estímulos, como la duración del día, para iniciar la floración.

Aún se desconoce el mecanismo molecular por el que las plantas obtienen y utilizan esta información, aunque los estudios genéticos han apuntado a algunos componentes que participan en esta vía de regulación. En *Arabidopsis*, las mutaciones en el gen *FLOWERING CONTROL LOCUS A* (*FCA*) provocan una floración tardía, tanto en días largos como en días cortos, y anulan la capacidad de florecer en respuesta al ascenso de temperaturas. Ese gen codifica una proteína de unión al ARN y presumiblemente participa en el procesamiento alternativo de los ARNm de otros genes que controlan la floración. Ello sugiere que la ruta de señalización definida por estos genes participa en la percepción de la temperatura y en la activación de la floración. Dentro de esta ruta se incluye el gen *FVE*, que codifica una proteína que forma parte de complejos proteicos implicados en el silenciamiento de genes a través de la organización de la cromatina.

Se desconocen todavía los sensores que perciben las variaciones iniciales en la temperatura media, aunque cabe la posibilidad de que la propia actividad bioquímica de las proteínas FCA y FVE sea sensible a dichos cambios. Se ignora también el mecanismo directo por el que las proteínas FCA y FVE regulan a sus genes diana, aunque sí se sabe desde hace algunos años que esas proteínas son necesarias para apagar la expresión de *FLC*. Nuevamente se pone de manifiesto la importancia de este represor de la floración en la regulación de dicho proceso. De hecho, se ha propuesto hace poco que FLC actuaría como un potente inhibidor de la ruta que lleva a la floración en respuesta a las altas temperaturas. Además de FLC, otros factores de transcripción de la familia MADS-box participarían en el mecanismo molecular que permite a la planta conocer la temperatura. Estas proteínas inhibidoras del inicio de la floración impiden, de manera similar a FLC, la activación del integrador floral *FT* que, como hemos visto anteriormente, también está regulado por el mecanismo encargado de percibir la duración relativa del día.

Una consecuencia interesante de que FT responda tanto a cambios del fotoperíodo como de temperatura es que a través de esta proteína se integran de manera sinérgica dos tipos de información complementarios, luz y temperatura, que varían a lo largo de las estaciones. La idea de la percepción coordinada de ambos parámetros viene apoyada por la observación del funcionamiento distinto de los fotorreceptores en función de la temperatura, de manera que actuarían como sensores de luz modulados por la temperatura ambiental.

CONTROL HORMONAL

Raro es el proceso fisiológico de las plantas en cuya regulación no intervenga una hormona vegetal. Esta afirmación se ilustra con ejemplos que van desde la germinación de las semillas (las giberelinas, unas hormonas, contrarrestan el letargo impuesto por el ácido abscísico durante el desarrollo embrionario y la maduración de las semillas), hasta la infección por patógenos (el ácido salicílico y el ácido jasmónico activan la respuesta sistémica de la planta para prevenir posteriores ataques) o la maduración de los frutos gracias al etileno [*véase* «Las hormonas vegetales», por Antonio Granell y Juan Carbonell; Investigación y Ciencia, abril de 1995]. De forma equivalente, algunas hormonas influyen de manera decisiva en determinar el momento de floración a lo largo del ciclo vital de la planta.

El efecto más llamativo sobre el control de la floración por una hormona lo protagonizan las giberelinas. En *Arabidopsis* y un gran número de dicotiledóneas, la deficiencia en la síntesis de estas hormonas impide a las células vegetales expandirse, lo que resulta en un tamaño reducido de la planta. Pero, además, las plantas de *Arabidopsis* con una escasa síntesis o percepción de las giberelinas florecen más tarde en condiciones de día largo, e incluso no florecen en absoluto cuando el día es corto. Estas observaciones hacen suponer que las giberelinas permitirían asegurar la floración en casos de ausencia de otros estímulos ambientales. Estas hormonas resultan aún más decisivas para algunas especies que habitan en los trópicos, para las que el paso de las estaciones no supone una señal instructiva.

La base molecular de la inducción de la floración por giberelinas parece residir principalmente en la activación de la transcripción del gen *LFY*, descrito en el laboratorio de Detlef Weigel, del Instituto Max Planck de Biología del Desarrollo, en Tubinga. *LFY* es uno de los últimos responsables de la puesta en marcha del programa de desarrollo floral, en el que también intervienen otros integradores florales, como *SOC1* o *AP1*. Esta activación está precedida por un aumento en paralelo de la con-

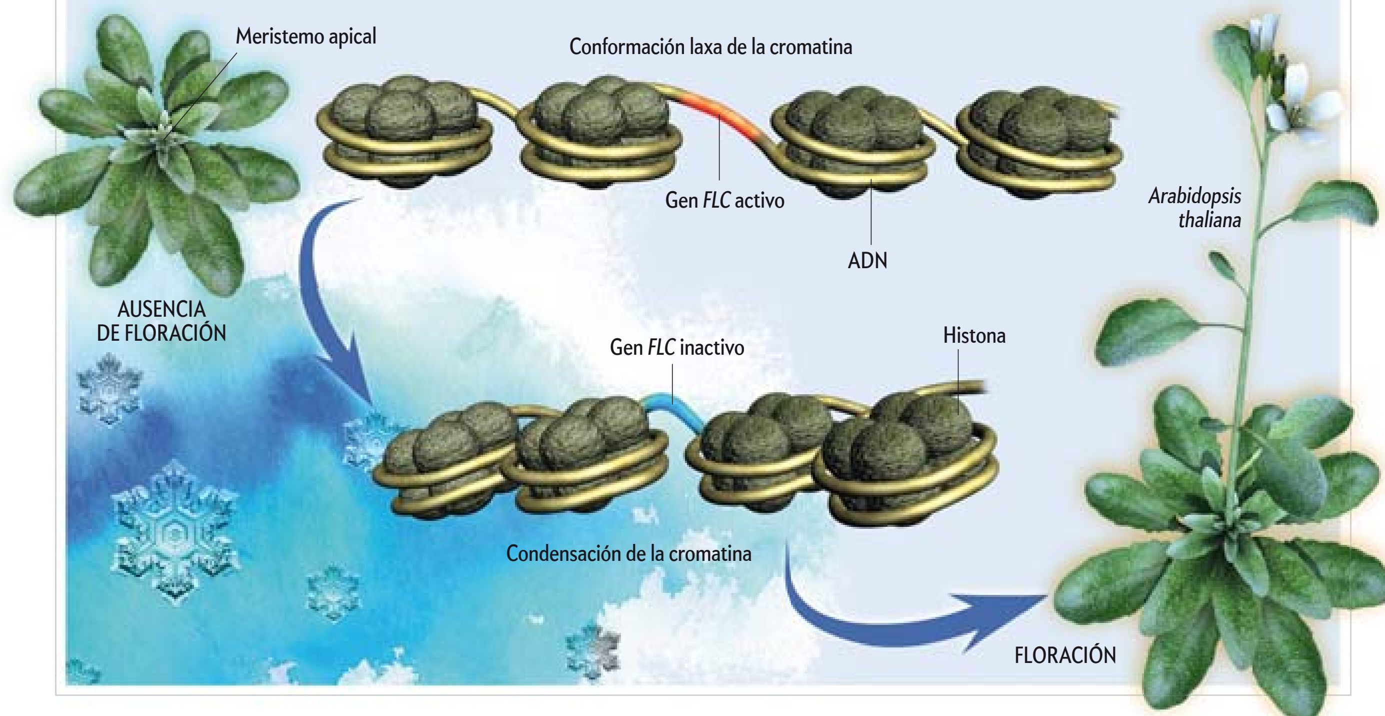
¿CUÁNDO FLORECER?

Un gen represor que controla la floración

La floración se produce solo cuando se inhibe el gen *FLC*. El proceso no puede tener lugar si ese gen se expresa y la proteína FLC se halla presente. La organización de la cromatina, constituida por el enrollamiento del ADN alrededor de ciertas proteínas, las histonas, representa el factor clave que controla la expresión o silenciamiento del gen *FLC*.

Durante la fase de semilla y al principio de la fase juvenil de *Arabidopsis thaliana*, varias proteínas inhiben la expresión de los integradores florales, lo que evita una floración prematura.

Después de un período vegetativo, las células del meristemo apical empiezan a producir flores. Ello sucede solo si se inhibe el gen *FLC* en esas células, lo que se consigue en la fase de vernalización: al pasar por un período prolongado de bajas temperaturas, se sintetiza un complejo de proteínas, entre las que se encuentran VIN3 y proteínas del grupo Polycomb como VRN2. Esas proteínas se unen al ADN a nivel del gen *FLC*, lo que provoca la condensación de la cromatina alrededor del gen y frena su expresión. Los genes florales pueden entonces activarse.



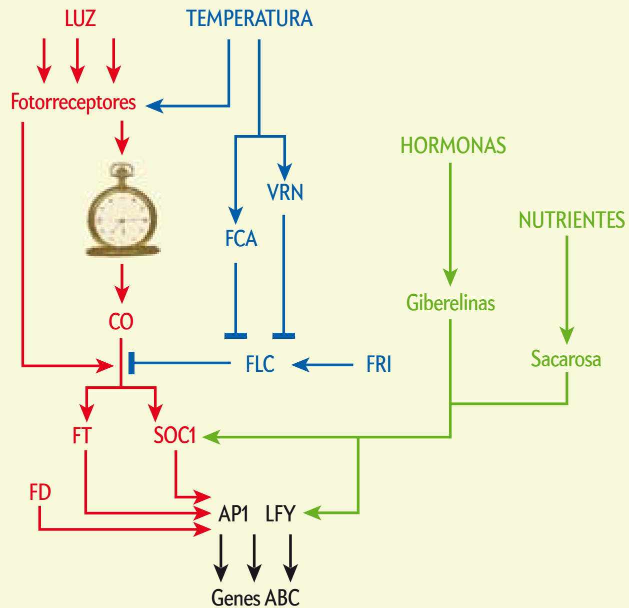
Las principales rutas florales

La floración está controlada por señales ambientales (como la longitud de los días y la temperatura) y por factores endógenos (como el estado nutricional y ciertas hormonas). Cada uno de estos factores activa cascadas de señalización particulares que acaban convergiendo en ciertos genes clave que integran información de distinta naturaleza. En última instancia, estos se encargan de poner en marcha los grupos de genes ABC responsables del desarrollo de la flor. (En el esquema, las líneas terminadas en una flecha indican un efecto promotor, mientras que las terminadas en una barra, un efecto inhibidor.)

Ruta dependiente del fotoperíodo (*rojo*): La longitud de los días se percibe a través de un mecanismo en el que participan los fotorreceptores y el reloj circadiano; ello permite que la proteína CONSTANS (CO) active a sus dianas *FT* y *SOC1* solo cuando los días se alargan.

Ruta dependiente de la temperatura (*azul*): Por una parte, la exposición transitoria a temperaturas próximas a la congelación —que indica que ha pasado el invierno— es necesaria para que los genes *VRN* silencien a *FLC*, un represor de la floración que impide que se active *FT*. Antes del invierno, el gen *FRI* hace aumentar la expresión de FLC y evita la floración. Por otra parte, el aumento paulatino de la temperatura cuando se acerca la primavera es percibido como una señal para que FCA inhiba también a FLC y se facilite así la activación de *FT* por parte de CO. De esta manera, *FT* se comporta como un integrador que se activa únicamente cuando las condiciones de luz y temperatura son propicias. Su función principal es conseguir que los genes *APETALA 1* (*AP1*) y *LEAFY* (*LFY*) se expresen por encima de cierto nivel umbral y se inicie el desarrollo floral.

Ruta dependiente de factores endógenos (*verde*): *LEAFY*, por su parte, también actúa de integrador de factores endógenos, como los que determinan el estado nutricional (en función de la sacarosa circulante por el floema) y otros factores endógenos de la planta (mediados por el contenido de las hormonas giberelinas).



centración de giberelinas y de la sacarosa circulante por el floema (el tejido que transporta sustancias de una parte a otra de las plantas). En ensayos in vitro, se ha comprobado que ambos compuestos activan el promotor del gen *LFY* de manera sinérgica. Esta observación apunta a un posible mecanismo de integración entre la edad de la planta y su estado nutricional, con el que se determina la capacidad de la planta para responder a las señales inductoras de la floración. En esta señal dependiente de la edad, los genes *TEMPRANILLO* (*TEM*) reprimen la expresión de FT, de manera que CO no pueda activar su expresión en fases juveniles del desarrollo.

FLORÍGENO: INTEGRACIÓN ESPACIAL DE LA SEÑAL

De todo lo expuesto se extrae una conclusión: las plantas han desarrollado un mecanismo de inducción de la floración que aglutina señales muy diversas, tanto ambientales como relacionadas con su estado nutricional y edad. Este mecanismo presenta la robustez necesaria para distinguir entre las señales reales y el ruido de fondo, la plasticidad que permite adaptarse a hábitats muy distintos y una estructura que limita la acumulación de mutaciones que impidan la floración. A ello contribuye en gran medida la arquitectura de la maquinaria de señalización de la floración, que se podría describir como una red de carreteras con múltiples nodos o intersecciones, todas confluyendo en un mismo destino. Así, en lugar de existir un único punto de integración de la información, las señales se van amplificando, matizando e integrando en numerosos nodos, que a su vez distribuyen la información en cascada.

Si nos fijamos en las señales inductoras de la floración podríamos definir esencialmente tres rutas de señalización: la ruta dependiente de fotoperíodo, la ruta dependiente de la temperatura y la ruta que responde al estado nutricional de la planta (basada en los azúcares circulantes y en las giberelinas).

Una observación interesante es que en la mayoría de las especies, la decisión de florecer no tiene vuelta atrás. ¿Cómo se convierten señales pequeñas, a veces aditivas y a veces contrapuestas, en una decisión concreta de florecer? De nuevo, la respuesta reside en la arquitectura de la red de señalización. En cada nodo de integración se evalúa el balance de actividades promotoras y represoras de la floración y el resultado se transmite al siguiente nodo en la cascada. En último término, la decisión irreversible de florecer depende de un mecanismo de acumulación progresiva de los integradores florales, que solo cuando superan cierto nivel umbral pueden activar el programa de desarrollo floral.

Por último, una cuestión planteada hace al menos un siglo y no resuelta hasta estos últimos años es cómo se produce la integración espacial de las señales inductoras de la floración. La idea de que las hojas participan en la generación de alguna señal química que influye a distancia en la floración la expresó por primera vez Julius von Sachs en 1865 y la rubricó James Knott (1934), de la Universidad de Cornell, con sus trabajos con la espinaca. Knott descubrió que la percepción del fotoperíodo

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA SEGÚN M. Á. BLÁZQUEZ, M. PINEIRO Y F. VALVERDE (ambas páginas)

tenía lugar en las hojas. Dado que el desarrollo floral sucede en el ápice de la planta, debería existir una señal de larga distancia que fuera transmitida desde las hojas hasta el ápice para iniciar la floración.

Sin embargo, el término «florígeno» fue acuñado por el fisiólogo vegetal ruso Mikhail Chailakyan (1936), quien demostró que la señal inductora de la floración podía ser transmitida mediante un injerto de plantas a las que se había inducido la floración a plantas que crecían en condiciones no inductoras. La universalidad de esta señal encontró apoyo en nuevos estudios con injertos interespecíficos realizados por Jan Zeevaart, de la Universidad de Michigan, a lo largo de varios años con la familia de las Crasuláceas, que cuenta con plantas de día largo y de día corto: en cualquiera de las combinaciones de injertos entre dichas plantas, la planta inducida transmitía la señal a la no inducida, aunque sus hábitos de floración fueran opuestos.

Desde entonces, la búsqueda del florígeno —la identificación de su naturaleza molecular— ha originado numerosas teorías. Georges Bernier, de la Universidad de Lieja, ha propuesto que el florígeno podría consistir en una mezcla de sustancias circulantes por el floema, que cuando alcanzaran unas proporciones relativas determinadas inducirían la floración. Esta observación viene apoyada por la capacidad florigénica que presentan algunas hormonas como las giberelinas o sustancias como la sacarosa, que circulan por el floema.

Sin embargo, varios resultados apuntan, de hecho, a la proteína FT como un componente fundamental del florígeno. En primer lugar, se sabía que FT se localiza preferentemente en el floema; en segundo lugar, se había identificado FT en el exudado floemático de *Brassica napus* en floración, y en tercer lugar, los estudios genéticos habían demostrado que FT resultaba indispensable para la inducción de la floración por parte de CO. Además, se encontró que FT formaba in vivo un complejo con FD, un factor de transcripción necesario para activar directamente a los genes que inician el programa del desarrollo floral y que se expresa únicamente en el ápice. Ello indicaba a las claras que FT, aunque se produjera en el floema de las hojas, se hallaba también presente en el ápice. Mediante técnicas inmunológicas y otros métodos, varios laboratorios, como el de George Coupland, del Instituto Max Planck de Desarrollo Vegetal de Colonia, han conseguido visualizar el movimiento de FT desde las células del floema hasta el meristemo apical. De modo interesante, se ha podido observar tanto en plantas de arroz como de *Arabidopsis*. El hecho de que el papel florigénico de FT se haya conservado y funcione con el mismo mecanismo en plantas tan alejadas evolutivamente apoya la universalidad de esta señal.

Las plantas son, pues, enormemente plásticas a la hora de determinar el momento exacto de florecer, y de ello depende su éxito como especies. Pueden notar casi cualquier variación ambiental, lo que les sirve para predecir e indicar el mejor momento del año para la floración. Además, se aseguran la percepción de los cambios gracias a una gran redundancia en la señalización, de manera que si una ruta falla, la planta todavía pueda dejar descendencia por un mecanismo alternativo. Estamos aún lejos de conocer todos los detalles de este imbricado sistema de señalización. Pero las investigaciones de los últimos años han permitido explicar el proceso molecular de una respuesta fisiológica vegetal de gran trascendencia para el desarrollo humano y que había permanecido secreta desde los comienzos de la agricultura.

PARA SABER MÁS

Regulation and identity of florigen: flowering locus T moves center stage. F. Turck, F. Fornara y G. Coupland en *Annual Review of Plant Biology*, vol. 59, págs. 573-594, 2008.
Mais qu'est-ce qui fait fleurir les plantes? F. Parcy en *Pour la Science*, vol. 381, julio de 2009.
Seasonal and developmental timing of flowering. R. Amasino en *Plant Journal*, vol. 61, págs. 1001-1013, 2010.



por José A. Jiménez



José A. Jiménez es catedrático de ingeniería y gestión de costas en la Universidad Politécnica de Cataluña.

Playas agotadas

Impedimos el aporte de sedimentos y alteramos la dinámica natural costera. ¿Y todavía nos extraña que las playas se hallen en retroceso?

Con la llegada del verano, nuestras playas reciben millones de personas dispuestas a pasar gran parte de su tiempo tumbadas en la arena, disfrutando de un merecido descanso al sol. Sin embargo, no muchos de esos visitantes son conscientes de que el simple hecho de poder poner la toalla sobre la arena requiere en numerosos casos un esfuerzo económico y ambiental no despreciable, sobre cuya sostenibilidad se ciernen negros nubarrones.

La playa no es más que un depósito, resultado de un balance de sedimento, es decir, de la diferencia entre entradas y salidas de arena. En nuestro entorno, prácticamente el 90 por ciento de las arenas que componen las playas provienen del aporte de ríos y rieras. Y aquí aparece el primer problema: la mayor parte de los ríos han perdido su capacidad de aportar sedimentos a la zona costera debido a perturbaciones de origen humano en las cuencas de drenaje, entre las que destaca la construcción de presas. Se trata de un problema global. Ya en 2005, James P. M. Syvitski, de la Universidad de Colorado en Boulder, publicó en *Science* un artículo en el que evaluaba la disminución de los aportes de sedimento fluviales a la zona costera en un billón de toneladas al año. Asimismo, deberíamos incluir el efecto de pequeña escala —pero relevante para algunas zonas— de las extracciones de áridos en cursos fluviales o el revestimiento y cubrimiento de rieras. Aunque el término de caudal ecológico en ríos es ampliamente utilizado en nuestra sociedad, resulta, cuanto menos, curioso que muy pocos lo planteen en términos de aporte de sedimento.

Una vez el sedimento llega a la playa, la dinámica litoral generada principalmente por olas y corrientes lo transportará a lo largo y a través de la costa, determinando la estabilidad de la playa. Pero aparece de nuevo la acción desestabilizadora de la actividad humana. La urbanización de la zona costera altera la dinámica natural de las playas, de forma que condiciona su estado presente y futuro.

La construcción de paseos marítimos y urbanizaciones en la parte posterior de las playas, ocupando en muchos casos antiguos cordones de dunas, elimina del balance sedimentario un gran volumen de arena que ya no podrá contribuir al equilibrio de las mismas. Asimismo, suponen un contorno rígido en esa zona, lo que limita el espacio de acomodación de la arena e impide su posible migración horizontal en situaciones de regresión a largo plazo —como podría ocurrir si subiese el nivel del mar.



GECKLY/FOTOLIA (*reloj de arena*), INVESTIGACIÓN Y CIENCIA (*fotocomposición*)

También la construcción de puertos y espigones altera el flujo de sedimento a lo largo de las playas. Estas estructuras actúan a modo de barreras: generan una acumulación de material en la cara que mira a la corriente y una pérdida equivalente en el lado contrario. El resultado final es un avance de la playa de levante y la erosión de la playa de poniente. Aunque en principio podría pensarse que se compensan pérdidas con ganancias, no es así. Al erosionarse una playa perdemos una serie de funciones (protección, recreativa, natural) que no se incrementan en el caso de que la playa crezca. El ejemplo más evidente lo muestran las playas muy anchas, donde usamos solo los metros más cercanos a la orilla, mientras que el resto queda como zona de paso.

La dinámica de ese sistema ya desestabilizado hace que la playa se erosione rápidamente durante el impacto de temporales pero se recupere mucho más lentamente por la acción del oleaje reconstructor. Este ciclo natural de erosión y acumulación resulta «incompatible» con el uso que hacemos de las playas, ya que queremos que estén listas al inicio de la temporada turística y no cuando la dinámica natural lo permita. La conjunción de todos estos factores hace que la mayor parte de las playas se encuentren en retroceso, con perspectivas más negativas todavía si consideramos el posible efecto de variaciones de origen climático como las debidas a una subida del nivel del mar.

En esa tesitura y ante nuestra incapacidad de restaurar las condiciones originales que mantenían el sistema en un equilibrio dinámico, las únicas alternativas que aparentemente hemos encontrado se basan en la compensación de las pérdidas de arena o la limitación de su movilidad. En el primer caso, se realizan vertidos de arena a la playa; sin embargo, dado que persisten las causas del problema, esos sedimentos tienen una vida limitada, lo que nos obliga a actuar de forma periódica. En el segundo caso, se construyen obras que reducen la cantidad de sedimento que es eliminada de la playa, lo que artificializa todavía más el litoral.

Ambas opciones implican una inversión económica y ambiental continuada para mantener un espacio que en muchos casos ha dejado de ser un medio natural para convertirse en algo similar a los recintos de arena que encontramos en los parques, solo que en este caso, los llamamos playas.

por Cristian A. Gallego Carmona, Julián Llano Mejía y Mario J. Gómez Martínez

Conservación de la herpetofauna

En el bosque seco tropical de Los Limones

El bosque seco tropical se define como el área comprendida entre los 0 y 1000 metros de altitud en la cual se presenta una marcada época seca con bajas precipitaciones y temperaturas que oscilan entre los 17 y 35 ºC. Debido al acelerado y amplio cambio en los usos del suelo, cada vez más dedicado a actividades humanas como la agricultura y la ganadería extensivas, se ha convertido en uno de los ecosistemas más amenazados del mundo.

Colombia alberga el 6,5 por ciento de la cobertura mundial de bosque seco tropical. A mediados del siglo pasado, el departamento del Tolima se consideró uno de los lugares con mayor cobertura de bosque seco tropical en la región central colombiana. En la actualidad, debido a su tendencia agropecuaria y a la carencia de alternativas de producción sostenible, conserva solo el 3 por ciento de la cobertura original.

En la localidad de Los Limones se halla uno de los fragmentos de bosque seco tropical mejor preservados del país, de 100 hectáreas de superficie, que limita con el río Magdalena, el más importante de Colombia. Con el propósito de estudiar la respuesta de los anfibios y reptiles a la pérdida y perturbación del bosque, herpetólogos de la Universidad del Tolima se han dado a la tarea de evaluar allí la composición de la herpetofauna. A finales de 2010, se habían asociado al bosque seco tropical de Tolima 47 especies de anfibios y 87 de reptiles, cifras que corresponden al 10 por ciento de la herpetofauna nacional. La gran mayoría de estas especies cuentan con poblaciones estables; sin embargo, el manejo inadecuado de este ecosistema puede alterar el equilibrio de las más sensibles.

Hypsiboas pugnax, rana arborícola ampliamente conocida por los habitantes de la zona debido a sus colores llamativos. Se encuentra generalmente asociada a los sectores más húmedos del bosque.

FOTOGRAFÍAS CORTESÍA DE LOS AUTORES

Engystomops pustulosus.
En la época reproductiva, el macho sujeta a la hembra en un abrazo nupcial mientras ella expulsa los huevos para que él los fecunde. Luego, el macho agita los huevos; se forma una espuma que proporciona las condiciones apropiadas para el desarrollo de los renacuajos.



Gonatodes albogularis,
o lagartija cabeciamarilla, es el reptil más abundante del bosque. Suele encontrarse en la base de los árboles más frondosos y presenta un comportamiento territorial.





En el departamento del Tolima medran 50 especies de serpientes. El hallazgo de numerosas oviposiciones muestra que varias especies del bosque de Los Limones llevan a cabo su ciclo de vida sin ninguna perturbación.

por José Carlos Pinto de Oliveira

José Carlos Pinto de Oliveira es profesor de filosofía de la ciencia de la Universidad estatal de Campinas, en Brasil.



Ciencia y arte: ¿vidas paralelas?

Thomas Kuhn se inspiró en la historia del arte como modelo para entender el desarrollo de la ciencia

Se puede afirmar sin temor a equivocarse que *La estructura de las revoluciones científicas*, de Thomas Kuhn, es el libro de filosofía de la ciencia más influyente de los últimos 50 años. Desde su publicación, en 1962, se ha hecho uso y abuso por doquier de las ideas de este filósofo e historiador de la ciencia, en especial de su noción de paradigma. En numerosas ocasiones aparecen los paradigmas ya sin Kuhn, hecho este que indica la completa asimilación cultural de los conceptos kuhnianos. La idea de paradigma es citada para entender un espectro teórico que va desde la matemática hasta la teología. Puede hallarse incluso en los cómics. Se usa para simular un argot científico en el discurso publicitario y empresarial, se emplea para hablar tanto de un nuevo sistema de hoja contable, como de un «revolucionario» método de alimentación de aves en cautividad...

Naturalmente, el arte se encuentra dentro del amplísimo abanico de objetos a los que se ha aplicado la noción de paradigma. Baste decir que ya se ha publicado un libro con el inequívoco título de *The structure of artistic revolutions*. Sin embargo, en este artículo nos centraremos sobre todo en el sentido inverso, es decir, en la transposición que Kuhn realizó del desarrollo del arte a la dinámica de la ciencia.

Los filósofos de la ciencia solo recientemente han prestado atención a esa relación. Para Kuhn, en cambio, se trataba de una cuestión clave: en sus propias palabras, el libro sobre las revoluciones científicas fue en realidad un «producto tardío» del «descubrimiento de los estrechos y persistentes paralelos que hay entre estas dos actividades», el arte y la ciencia. Él mismo confiesa que hasta ese momento había contemplado estos dos ámbitos como polos opuestos: arte y ciencia, el mundo de los valores y el mundo de los hechos, lo subjetivo y lo objetivo, lo intuitivo y lo inductivo.

En el mismo capítulo de su libro *La tensión esencial*, Kuhn trata de modo explícito las relaciones entre ciencia y arte, y nos remite al historiador del arte Ernst Gombrich. No deja margen para la especulación respecto al tipo de historia del arte a la que se está refiriendo. Tratemos, pues, de identificar en este contexto qué elementos del desarrollo del arte son apropiados, según Kuhn, para comprender la marcha de la ciencia.

Al mirar, por ejemplo, los relieves y pinturas murales egipcios, es muy probable que nos resulten extraños y que nos causen cierta perplejidad. Como escribe Gombrich en su libro *La historia del arte*, «tal vez esto guarde relación con la diferencia de fines que inspiró sus pinturas». «Dibujaban de memoria, de conformidad con reglas estrictas». Representaban, característicamente, la cabeza humana siempre de perfil, pero a la vez con los ojos vistos de frente.

Ese estilo egipcio, más conceptual, difiere profundamente del arte griego. Fue en Atenas, a partir del siglo VI a.C., donde se produjo, según Gombrich, «la mayor y más sorprendente revolución en toda la historia del arte», con el descubrimiento del escorzo y la perspectiva. Los artistas griegos «partieron del punto donde se habían detenido los egipcios y asirios». Pero no se trataba ya de fórmulas milenarias y universales para representar el cuerpo humano. Cada artista griego quería saber «cómo *él* tenía que representar un cuerpo determinado. Los egipcios basaron



WIKIMEDIA COMMONS

su arte en el conocimiento. Los griegos comenzaron a servirse de sus ojos».

Una revolución del mismo tenor que la griega aconteció de nuevo en Italia en el siglo xiv. Según Gombrich, el arte cristiano primitivo, anterior a Giotto, había revertido a ciertos patrones del arte egipcio. Y la nueva perspectiva culminó con el Renacimiento, en el siglo xvi, cuando se admitía que la pintura había alcanzado la perfección con artistas como Miguel Ángel, Rafael y Da Vinci.

Pero, ¿tiene sentido preguntar si Miguel Ángel era mejor pintor que un artista cristiano del siglo xiii, o si los griegos fueron mejores pintores que los egipcios, o incluso, para poner el ejemplo de dos grandes pintores españoles, si Picasso fue mejor que Velázquez?

En el arte parece que no tiene pleno sentido comparar dos pintores de estilos tan diferentes como Velázquez y el Picasso cubista, y preguntar cuál de ellos era el mejor en su oficio. Ambos tenían concepciones muy distintas, del mismo modo que el artista egipcio y el griego, o el pintor renacentista y el cristiano bizantino. No habría, por tanto, un criterio único, un denominador común, que permitiese evaluar la calidad de uno frente a la del otro.

El caso de la ciencia se supone completamente distinto. Para resumir la cuestión, diremos que el arte puede presentar un progreso acumulativo *en el interior de un estilo*, pero solo la ciencia presenta un progreso *a lo largo de todo su trayecto*. Mas, siendo así, ¿cómo es que Thomas Kuhn pretendió cambiar esta imagen tradicional de la ciencia aproximándola a la del arte?

Físico de formación, Kuhn descubrió, gracias a su contacto con la historia de la ciencia, una nueva imagen de su propia especialidad. Esa experiencia personal por la que pasó como científico es algo que, como él mismo reconoce, «la mayoría de los historiadores aprende por medio de ejemplos en el curso de su entrenamiento profesional». Con ello quiere decir que los historiadores de otras disciplinas, incluidos los historiadores del arte, ya estaban preparados para lidiar con una situación en la que existen rupturas conceptuales en su objeto de estudio, como en el caso de las diferentes escuelas filosóficas o de los distintos estilos artísticos. Pero el científico, e incluso el filósofo y el historiador tradicional de la ciencia, no. La razón de ello reside justamente en la asunción de una presunta diferencia entre la ciencia y las demás disciplinas.

Kuhn se sintió especialmente impresionado por las situaciones históricas en las que hubo que elegir entre teorías científicas alternativas. La historia real de la ciencia, según él, niega apoyo a la clase de relación entre teorías imaginada por los filósofos anteriores, como los positivistas lógicos y Karl Popper. Antes bien, apunta hacia una relación más compleja. Las teorías rivales difieren entre sí de un modo más radical de lo que la tradición nos había hecho creer. En determinadas ocasiones, la decisión que se plantea ante los científicos hace entrar en juego formas alternativas de concebir un objeto y de hacer ciencia; como si en verdad las teorías en disputa perteneciesen a diferentes «estilos», a los cuales Kuhn denominó precisamente *paradigmas*.

Elegir entre ciertas teorías científicas resulta tan complejo como elegir entre estilos artísticos

De acuerdo con Kuhn, las revoluciones en ciencia son episodios de sustitución de teorías o, más adecuadamente, de paradigmas. Describe numerosos ejemplos de este tipo de casos tomados de la historia de la ciencia. La idea de revolución científica proviene de una característica fundamental de la relación entre teorías científicas. Kuhn intentó captar esta característica con su famoso concepto de *inconmensurabilidad*.

Como el lector ya puede adivinar, la inconmensurabilidad corresponde a una relación similar a la que se da entre los diferentes estilos en el arte. Los contemporáneos de Miguel Ángel juzgaban que él era mejor escultor que los griegos. Esta comparación era posible porque las obras de Miguel Ángel y las griegas podían ser consideradas manifestaciones de un mismo estilo. Después de todo, el denominado Renacimiento era, precisamente, el renacimiento del arte griego y romano. A la inversa, como vimos, sería mucho más complejo comparar al artista griego con el egipcio, o a Velázquez con el Picasso cubista, para saber cuál sería el mejor. Kuhn diría que los estilos distintos son inconmensurables, o sea, que las obras de arte de diferentes estilos no pueden ser comparadas del mismo modo en que lo son las obras de un mismo estilo. Diría también —y aquí reside la originalidad de su pensamiento— que en ciencia sucede algo análogo.

Pero, por supuesto, también existen diferencias entre el arte y la ciencia. La más importante de ellas supone un serio problema para Kuhn. La ciencia se presenta en un marco no relativista, con la pretensión de que sus teorías son verdaderas. Por el contrario, el arte parece no tener un contenido esencialmente cognitivo. Los cuadros, las esculturas o los poemas no son, en principio, ni verdaderos ni falsos. Como dice el filósofo de la ciencia Rudolf Carnap, «un poeta no afirma que los versos de algún otro son equivocados o erróneos; por lo general se contenta con decir que son malos».

La aproximación de la ciencia al arte, ¿no llevaría a pensar que la elección entre dos teorías científicas es, al igual que la elección entre estilos artísticos, una mera cuestión de gusto? Y se dice que el gusto no se discute... ¿Dónde quedaría entonces el proverbial sentido crítico de la ciencia? Es decir: ¿cómo podría la ciencia seguir siendo una actividad esencialmente racional si se la coloca en la «mala compañía» del arte? Y si se cree que no se puede hablar de progreso en el paso de un estilo artístico a otro, ¿cómo se podría hablar entonces de progreso científico? ¿Acaso habría que pensar en una nueva idea de racionalidad y de progreso?

Estas son justamente las cuestiones fundamentales que Kuhn intentó responder a través de su filosofía de la ciencia. La investigación actual sobre el paralelismo entre la historia de la ciencia y la historia del arte tal vez nos ofrezca ocasión para comprender mejor esas preguntas y desarrollar nuevas respuestas.

PARA SABER MÁS

La estructura de las revoluciones científicas. Thomas Kuhn. Fondo de Cultura, 2006 [1962].

La tensión esencial. Thomas Kuhn. Fondo de Cultura, 1996 [1977].

Thomas Kuhn, la historia de la ciencia y la historia del arte. J. C. Pinto de Oliveira en *Estudios contemporáneos sobre Epistemología*. Dirigido por Sergio Menna. Universitas, 2008.

Historia de la ciencia, historia del arte y racionalidad práctica. J. C. Pinto de Oliveira. En *Estudios Filosóficos*, vol. LX, n.º 173, 2011 (número monográfico dirigido por Alfredo Marcos y Ana Rosa Pérez Ransanz).

DEMONIOS, ENTROPÍA Y LA BÚSQUEDA DEL CERO ABSOLUTO

Un experimento imaginario del siglo XIX se ha convertido en un procedimiento factible para alcanzar temperaturas extremadamente bajas

Mark G. Raizen



Mark G. Raizen ocupa la cátedra Sid W. Richardson de física en la Universidad de Texas en Austin. Sus intereses comprenden las trampas ópticas y el entrelazamiento cuántico.



Mientras usted lee estas palabras, las moléculas del aire vuelan a su alrededor a 3000 kilómetros por hora, más rápidas que una bala. Entre tanto, los átomos y las moléculas de su cuerpo se agitan, vibran y chocan entre sí. Nada en la naturaleza permanece jamás en completo reposo. Cuanto más rápido se mueve un cuerpo, más energía posee. La energía colectiva de átomos y moléculas se corresponde con lo que llamamos calor, y como tal lo percibimos.

Aunque la inmovilidad total —el estado que se corresponde con el cero absoluto de temperatura— resulta físicamente inalcanzable, los científicos se han aproximado cada vez más a dicho límite. En tales condiciones extremas, los efectos cuánticos comienzan a manifestarse y aparecen nuevos e inusuales estados de la materia. Al enfriar átomos en estado gaseoso hasta una fracción de grado por encima del cero absoluto, se ha observado el comportamiento ondulatorio de las partículas; gracias a ello se han construido los instrumentos de medida más precisos de la historia y relojes atómicos de una exactitud sin precedentes.

El punto débil de las técnicas de enfriamiento tradicionales reside en que funcionan solo con unos pocos elementos de la tabla periódica, lo que limita su utilidad. El hidrógeno, por ejemplo, el átomo más simple de todos, se resistió durante largo tiempo a ser enfriado. Ahora, sin embargo, nuestro equipo de investigación ha desarrollado un nuevo método que funciona con la mayoría de los elementos y con numerosos tipos de moléculas. Para ello, hemos llevado a la práctica un experimento imaginario que James Clerk Maxwell ideó en el siglo xix. El físico escocés teorizó sobre la posibilidad de un «demonio» que parecía violar las leyes de la termodinámica.

La técnica dará lugar a toda una gama de aplicaciones y abrirá nuevos caminos en investigación básica. Algunas de sus variantes quizá permitan purificar isótopos poco comunes y de gran utilidad en medicina. Otras mejorarán la precisión de los procesos de fabricación de circuitos integrados. Además, enfriar átomos y moléculas ayudará a explorar la tierra de nadie que se extiende entre la física cuántica y la química ordinaria, o las posibles diferencias entre el comportamiento de la materia y el de la antimateria. Y gracias al enfriamiento extremo del hidrógeno y sus isótopos, laboratorios pequeños podrán afrontar algunas cuestiones de física fundamental que, hasta ahora, han sido dominio exclusivo de los mastodónticos aceleradores de partículas.

VELOCES COMO BALAS

Detener y manipular átomos y moléculas no resulta tarea fácil. En un experimento típico, un sólido se calienta o se vaporiza con un láser para obtener un gas rarificado de algún elemento químico. Después, ese gas debe frenarse, confinarse en una cámara de vacío y mantenerse alejado de las paredes.

El primer paso de nuestro método de enfriamiento se basa en un truco bastante antiguo. Hace más de cuarenta años, se descubrió que, a una presión de varias atmósferas, un gas que escapase hacia el vacío a través de un pequeño orificio experimentaba un descenso de temperatura significativo a medida que se expandía. Una cualidad notable de estos haces es que resultan casi monoenergéticos; en otras palabras, todas las moléculas poseen una velocidad muy cercana al promedio. Si el haz escapa a 3000 kilómetros por hora, por ejemplo, la velocidad de cada una de sus moléculas se desviará de dicha cifra en no más de unos 30 km/h. A efectos de comparación, consideremos las moléculas del aire a temperatura ambiente: con una velocidad promedio de 3000 km/h, las hay que se desplazan a 1 km/h y también a 7000 km/h. Desde el punto de vista termodinámico, que un haz sea casi monoenergético quiere decir que, aunque posea una cantidad sustancial de energía, se encuentra extremadamente frío. Piénselo así: un observador que se moviera a la velocidad del haz, a 3000 km/h, vería que las moléculas se agitan tan despacio que les asignaría una temperatura de tan solo una centésima de grado por encima del cero absoluto.

Por tanto, si fuese posible frenar el haz sin arruinar esa pequeña dispersión en la distribución de velocidades, obtendríamos un conjunto de átomos muy fríos, los cuales podríamos atrapar y enfriar aún más. Junto a Uzi Even, químico de la Universidad de Tel Aviv, nuestro grupo empezó a trabajar en el proyecto en 2004. Nuestro primer intento consistió en construir un

EN SÍNTESIS

Los métodos tradicionales para enfriar gases hasta cerca del cero absoluto funcionan solo con algunos elementos químicos.

La conjunción de dos técnicas novedosas logra enfriar átomos de casi cualquier elemento e incluso algunas moléculas.

Una de las técnicas es una implementación física del célebre experimento imaginario conocido como «demonio de Maxwell».

Las aplicaciones abarcan el estudio de las partículas elementales, la separación de isótopos y las técnicas de nanofabricación.

ADAM VOORHES

rotor cuyas paletas, en sus extremos, se moviesen a la mitad de la velocidad del haz. Apuntamos este hacia las palas del rotor que se movían hacia atrás, de tal modo que la velocidad del haz se cancelase justo con la de los álabes. Cuando los átomos del gas rebotaran en el rotor, este absorbería toda su energía cinética; algo parecido a parar en seco una pelota de tenis con una raqueta que se desplaza hacia atrás.

El montaje, sin embargo, resultó difícil de manejar, ya que requería un ajuste demasiado fino. Robert Hebner, director del Centro de Electromecánica de la Universidad de Texas en Austin, sugirió un diseño diferente: proyectar el haz sobre la parte posterior de un proyectil que se desplazara a través de un cañón de bobinas. Un cañón de bobinas es un arma experimental que, en lugar de emplear una detonación de pólvora, dispara proyectiles tras acelerarlos en un campo magnético. El obús atraviesa una serie de bobinas por las que circula una corriente eléctrica, de manera que se crea un campo magnético a lo largo del cañón. El proyectil, que en esencia consiste en un imán, se ve atraído hacia el centro de la bobina por la que está pasando. En principio, una vez llegase al centro y lo sobrepasase, las mismas fuerzas comenzarían a tirar de él en sentido contrario, pero la corriente de cada bobina se interrumpe justo cuando el proyectil llega al punto medio, de tal manera que el campo magnético siempre impulsa al proyectil en el mismo sentido, a lo largo del eje del cañón.

Pronto me di cuenta de que podíamos aplicar la idea de Hebner, pero sin necesidad del proyectil. Usaríamos el mismo principio directamente sobre el haz para generar el efecto opuesto: en lugar de acelerar una bala, frenaríamos las moléculas. Semejante técnica resulta factible gracias a que la mayoría de los átomos poseen cierto magnetismo (propiedad que se extiende a todos los átomos cuyos electrones se encuentran excitados). Numerosas moléculas exhiben también un campo magnético.

Construimos el nuevo dispositivo y lo ensayamos primero con átomos de neón excitados y, después, con moléculas de oxígeno. Logramos detener ambas especies. De manera independiente, un grupo de Zúrich dirigido por Frederic Merkt había elaborado un dispositivo similar, con el que consiguieron detener hidrógeno atómico aproximadamente al mismo tiempo que nosotros realizábamos nuestros experimentos. Varios grupos de todo el mundo ya han construido sus cañones de bobinas para átomos. En definitiva, se trata de dispositivos muy simples y robustos, construidos a partir de cable de cobre común, condensadores y transistores comerciales.

Tras detener átomos de esa manera, fue bastante sencillo atraparlos en campos magnéticos estáticos. El problema más arduo consistió en hallar un método para enfriarlos aún más. Aunque 0,01 grados Kelvin (una centésima de grado sobre el cero absoluto) parece frío, la cota queda muy lejos de los límites alcanzados con otras técnicas. Necesitábamos algo que nos permitiese ir más allá.

UN DEMONIO A NUESTRO SERVICIO

La solución se nos resistió largo tiempo. El enfriamiento por láser, inventado durante los años ochenta, ha cosechado un éxito enorme y ha permitido la creación del estado de la materia conocido como condensado de Bose-Einstein, logros que han sido recompensados con la concesión de los premios Nobel de física en 1997 y 2001. Pero las posibilidades del enfriamiento por láser se limitan, sobre todo, a los átomos de la primera columna de la tabla periódica, como el sodio o el potasio, ya que en ellos puede permutarse con facilidad entre el estado fundamental y un estado excitado, como requiere la técnica. Otro método consiste en el enfriamiento por evaporación. Este se basa en ir extrayendo de un material los átomos a mayor temperatura y dejar los más fríos (el mismo principio por el que el sudor, al evaporarse, nos refresca la piel). Pero, sin la ayuda del enfriamiento por láser, resulta muy difícil obtener una densidad lo bastante alta como para que comience la evaporación.

En febrero de 2004 visité la Universidad de Princeton y hablé con Nathaniel J. Fisch, experto en física de plasmas. Me hizo saber de una idea que acababa de poner en práctica para establecer una corriente de electrones a través de un plasma (un gas de electrones e iones positivos) mediante un ardid que induce el movimiento de los electrones en un sentido, pero no en el opuesto. Me pregunté si podríamos conseguir algo parecido con átomos o moléculas: construir una «puerta» que dejara pasar átomos en un sentido, pero no en otro.

Obviaré por un momento los aspectos técnicos relativos a la construcción de la puerta de un solo sentido y explicaré primero por qué un dispositivo de esta suerte ayuda a enfriar un gas. El primer paso consiste en reducir el volumen del gas, pero sin elevar su temperatura. Imaginemos un recipiente que consta de dos partes, una a la derecha y otra a la izquierda, separadas por una puerta. Los átomos del gas rebotarán al azar en el interior de la cavidad, por lo que antes o después atravesarán la puerta. Pero si esta les deja pasar solo en un sentido —de izquierda a derecha, pongamos por caso—, al final todos los átomos se concentrarán en la parte derecha. El aspecto crucial de todo el proceso reside en que, al atravesar la puerta, la velocidad de los átomos no se modifica, por lo que la temperatura del gas permanece constante. (Desde un punto de vista termodinámico, este procedimiento difiere por completo de comprimir el gas y empujarlo hacia la parte derecha; esto último sí aceleraría los átomos e incrementaría la temperatura del gas.) Después, hemos de dejar que el gas se expanda y recupere su volumen original. Cuando un gas se expande, su temperatura decrece, razón por la cual los botes vaporizadores se enfrían cuando los utilizamos. Como resultado final, el gas ocupa el mismo volumen que al principio, pero su temperatura ha disminuido.

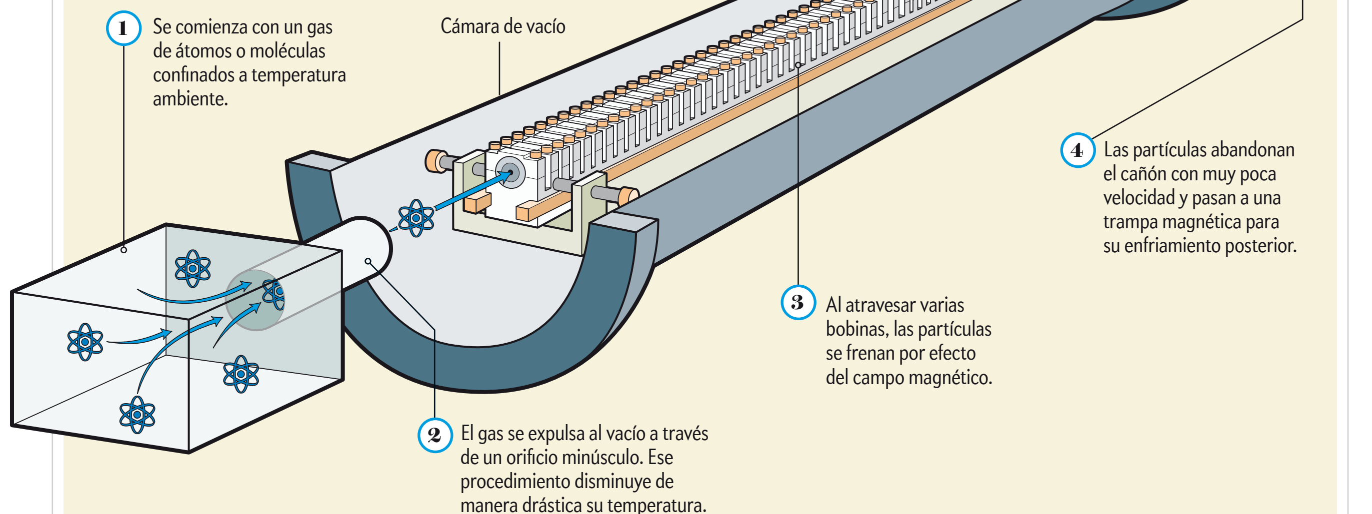
Lo desconcertante de la propuesta reside en que una compuerta que seleccione átomos de esa manera parece violar las leyes de la física. En el estado comprimido, el gas posee menos entropía (una cantidad que mide el desorden de un sistema) que al principio. Sin embargo, la segunda ley de la termodinámica dicta la imposibilidad de reducir la entropía de un sistema sin gastar energía y sin generar más entropía en otro sitio.

La paradoja se viene discutiendo desde que, allá por 1871, James Clerk Maxwell propusiese un experimento imaginario en el que «un ser inteligente con mano diestra» vigilase las partículas que vienen y van y abriese la puerta del modo apropiado. Esta hipotética criatura, hoy conocida como «demonio de Maxwell», parecía violar la segunda ley de la termodinámica, puesto que podía reducir la entropía de un gas mediante un gasto insignificante de energía. No sería hasta 1929 cuando Leo Szilard propusiera una solución a la paradoja. Arguyó que, cada vez que la trampilla se abre, el demonio acumula información. Y esa información, razonaba, lleva entropía, la cual compensa exactamente el descenso de la entropía del gas. (Szilard se adelantó a su tiempo: decenios más tarde, la idea de que la información posee un significado físico real daría lugar al enfoque moderno de la ciencia de la información.)

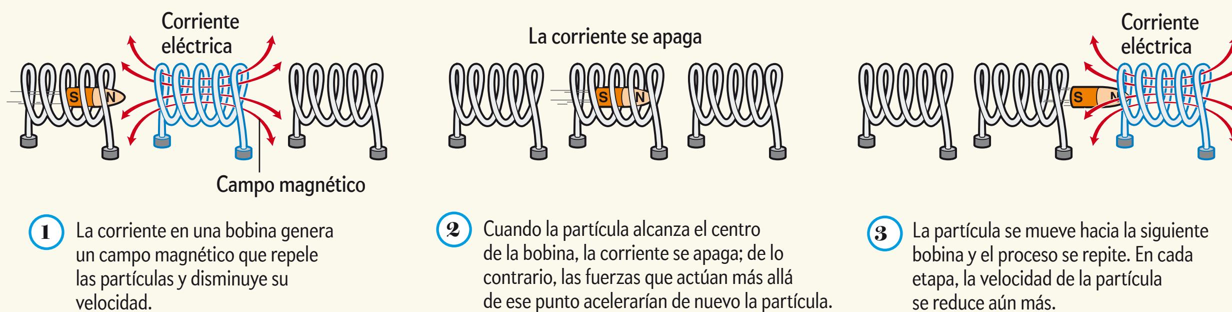
Durante decenios, toda consideración sobre el demonio de Maxwell —incluida la solución de Szilard— quedó en el terreno

Freno magnético

En la primera etapa del proceso, un gas se enfría hasta temperaturas del orden de la centésima de grado Kelvin. Para ello, se inyecta un fino haz de partículas del gas hacia una cámara de vacío, lo cual disminuye su temperatura de manera drástica. Después, el haz se frena con un cañón de bobinas atómico. Los cañones de bobinas fueron concebidos como armas experimentales, diseñadas para acelerar proyectiles en campos magnéticos. El cañón de bobinas atómico aplica la misma idea para conseguir el efecto opuesto: frena cualquier átomo o molécula que posea un polo norte y un polo sur magnéticos, una propiedad que exhiben la mayoría de los elementos de la tabla periódica.



Funcionamiento del cañón de bobinas



1 La corriente en una bobina genera un campo magnético que repele las partículas y disminuye su velocidad.

2 Cuando la partícula alcanza el centro de la bobina, la corriente se apaga; de lo contrario, las fuerzas que actúan más allá de ese punto acelerarían de nuevo la partícula.

3 La partícula se mueve hacia la siguiente bobina y el proceso se repite. En cada etapa, la velocidad de la partícula se reduce aún más.

de la especulación. Ahora, sin embargo, nuestro equipo ha desarrollado la primera realización física del experimento imaginario de Maxwell, tal y como él lo concibió. (Otros experimentos recientes han obtenido resultados similares mediante nanomáquinas en lugar de puertas). Gracias a nuestra técnica, logramos enfriar átomos a temperaturas de hasta 15 millonésimas de kelvin. Y, como veremos ahora, nuestro dispositivo no solo demuestra que es posible construir un demonio de Maxwell, sino también que Szilard se hallaba en lo cierto.

Para que la puerta de un solo sentido funcione, los átomos del gas deben poseer dos estados (dos configuraciones electrónicas posibles); ambos de baja energía y, por tanto, estables. Llamemos a tales estados «rojo» y «azul». Los átomos flotan en un recipiente al que un rayo láser divide por la mitad. El láser se sintoniza a una longitud de onda tal que los átomos rojos rebotan en él. Para estos, por tanto, el láser funciona como una puerta cerrada. En un principio, todos los átomos son azules, por lo que pueden atravesar la barrera láser. Pero, justo a su derecha, incide sobre ellos un segundo láser, el cual se encuentra sintonizado a una frecuencia que induce la transición del estado azul al estado rojo. Dicha transición se logra mediante la dispersión de un solo fotón. Esos átomos rojos se ven ahora repelidos por el primer láser, por lo que quedarán confinados en la parte derecha. Al final, todos los átomos acabarán allí y la parte izquierda quedará vacía.

A principios de 2008 demostramos que la puerta funcionaba con rubidio atómico. Denominamos a nuestro método «enfriamiento con un solo fotón», para distinguirlo del enfriamiento con láser ya existente, el cual emplea una gran cantidad de fotones para cada átomo.

Mientras tanto, y sin que lo supiéramos, Gonzalo Muga, de la Universidad del País Vasco, y Andreas Ruschhaupt, ahora en

ILUSTRACIÓN DE BROWN BIRD DESIGN

Más frío, más rápido... y más allá

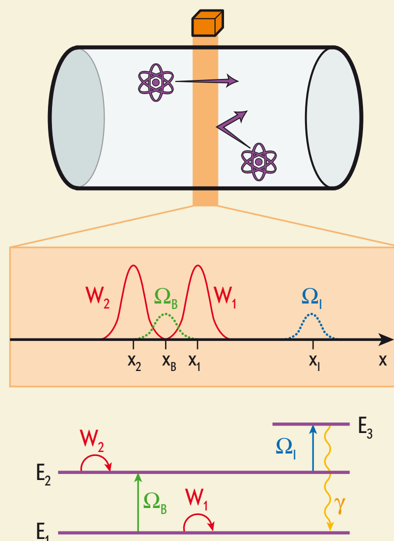
Diodos atómicos, mejores técnicas de frenado y atajos a la adiabaticidad

GONZALO MUGA

Enfriar átomos a temperaturas próximas al cero absoluto constituye un reto técnico y científico cuya importancia resulta difícil de subestimar, puesto que representa un paso decisivo hacia el dominio exhaustivo de la materia. La velocidad del átomo es una cantidad vectorial, por lo que podemos intentar controlar su módulo, su dirección o su sentido. En los últimos treinta años se han conseguido avances significativos en los dos primeros aspectos. Las trampas magnéticas o las técnicas tradicionales de enfriamiento por láser permiten el control del módulo, mientras que para gobernar la dirección del movimiento pueden emplearse guías de onda: un haz láser cuya frecuencia se encuentre desintonizada hacia el rojo con respecto a la de una transición atómica actúa como una tubería que conduce átomos fríos. También pueden diseñarse caminos más complejos mediante campos magnéticos en cables de espesor nanométrico. De hecho, ya se construyen circuitos en los que, en lugar de electrones, se transportan y manipulan átomos.

En 2004, junto a Andreas Ruschhaupt, por entonces estudiante postdoctoral en nuestro grupo de investigación en la Universidad del País Vasco, abordamos el proyecto de diseñar elementos de control *atomotrónico*; es decir, dispositivos que imitasen las propiedades de los componentes básicos habituales en electrónica. Uno de los componentes que carecían de análogo atómico era el diodo, un elemento que permite el paso de la corriente en un sentido, pero no en el opuesto.

¿Cómo conseguir que un átomo se mueva en un solo sentido? En principio, sabemos que las leyes que rigen la dinámica de sistemas aislados son simétricas con respecto a la inversión temporal: si cierto proceso resulta posible (por ejemplo, que un átomo atraviese una barrera de izquierda a derecha), el proceso invertido (cruzar la barrera de derecha a izquierda) también está permitido. Sin embargo, la experiencia nos enseña que existen maneras de evitar este problema. Después de todo, existen los diodos electrónicos o las válvulas que controlan el flujo de líquidos. Tales dispositivos operan gracias a que, antes o después, tiene lugar un proceso irreversible —como la fricción— que rompe la invariancia frente a la inversión temporal. A escala atómica, uno de los procesos irreversibles resulta de la emisión espontánea de un fotón por parte de un átomo excitado.



Tras un período de ensayo y error, dimos con un modelo de diodo atómico que aprovechaba la estructura interna del átomo y su interacción con un láser. Dichas interacciones pueden ser resonantes (cuando la frecuencia del láser se sintoniza para que la energía de los fotones coincida con la diferencia de energías entre dos niveles atómicos) o desintonizadas. En el primer caso, se inducen transiciones entre niveles atómicos; en el segundo, se generan fuerzas atractivas o repulsivas, las cuales dependen de la frecuencia del láser y del estado interno del átomo.

Por simplicidad, consideremos un átomo con solo dos niveles internos, uno fundamental y otro excitado. En tal caso, un diodo atómico consta de dos haces láser cuyas frecuencias respectivas se ajustan para que cada uno de ellos ejerza fuerzas repulsivas sobre los átomos que se encuentran en un estado, pero no sobre los otros. Entre ambos, una zona de bombeo induce transiciones del estado fundamental al excitado. Si suponemos un montaje como el que muestra la figura, un átomo que

Diodo atómico

Una configuración adecuada de láseres permite a los átomos pasar en un solo sentido (*arriba*). Los láseres se disponen de izquierda a derecha tal y como indica la figura (*centro*): W_2 y W_1 funcionan como barreras de potencial (*rojo*) que solo afectan, respectivamente, a los átomos que se encuentren en el estado excitado E_2 o en el fundamental E_1. El láser central (*verde*) induce transiciones desde el estado fundamental al excitado. De esta manera, los átomos en el estado fundamental que llegan desde la izquierda pueden atravesar la barrera. Tras hacerlo, retornan al estado fundamental mediante la emisión de un fotón (*amarillo*), la cual puede inducirse con ayuda de otro láser (*azul*).

la Universidad Leibniz de Hannover, habían desarrollado de manera independiente una idea similar. Desde entonces, junto a Muga y Ruschhaupt, hemos dilucidado algunos aspectos teóricos de la compuerta. En un artículo que publicamos juntos en 2006, señalamos que, cuando un átomo dispersa un fotón, este se lleva consigo algo de información sobre el átomo —y, con ella, un cuanto de entropía—. Además, mientras que el fotón original formaba parte de un tren de fotones ordenados (el haz láser), el fotón dispersado sale en una dirección arbitraria. De esta manera, crece el desorden entre los fotones. En nuestro trabajo demostramos que el aumento en la entropía de la luz compensaba exactamente la disminución de entropía que experimentaban los átomos. Por tanto, la técnica de enfriamiento con un único fotón funciona como un demonio de Maxwell justo como lo imaginó Leo Szilard en 1929. En este caso, se trata de un demonio muy simple y eficiente: un haz láser que induce un proceso irreversible mediante la dispersión de un solo fotón. Nuestro demonio no es un ser inteligente ni un ordenador. No necesita tomar decisiones a partir de la información almacenada en los átomos: basta con que la información se encuentre disponible y, al menos en principio, pueda colectarse.

APLICACIONES

Un control tan fino del movimiento de átomos y moléculas abre grandes perspectivas. Desde hace tiempo se sueña con atrapar y enfriar moléculas para estudiar reacciones químicas en el régimen cuántico. El cañón de bobinas funciona con cualquier molécula magnética; además, sirve de complemento a otro método, el cual emplea campos eléctricos en vez de magnéticos para frenar moléculas con polarización eléctrica. Si las molécu-

se halle en el estado fundamental y que se aproxime desde la derecha a la zona iluminada se topará con la barrera y será reflejado. En cambio, si lo intenta desde la izquierda, no hallará en el primer láser obstáculo alguno; después será excitado, con lo que también sorteará la barrera de la derecha, y finalmente decaerá (de manera espontánea o inducida) al estado fundamental, con lo que quedará atrapado en la parte derecha del dispositivo. Este último paso, caracterizado por la emisión de un solo fotón, constituye el proceso irreversible del que hablábamos más arriba.

Si bien el láser de la izquierda puede parecer superfluo (pues, en principio, todos los átomos tienden a ocupar el nivel fundamental), su presencia es imprescindible para que el diodo funcione con eficacia. La razón obedece a que la presencia de los láseres de bloqueo, que actúan como barreras de potencial, modifica los niveles de energía internos de los átomos y, con ello, las transiciones involucradas en el proceso. El láser de la izquierda corrige ese efecto y hace que el bombeo funcione de la manera deseada.

Existen otras variantes del mecanismo que acabamos de explicar, como las desarrolladas por los laboratorios de Mark Raizen o de Dan Steck, de la Universidad de Oregón. El esquema anterior presenta dos ventajas fundamentales: por un lado, funciona en un amplio intervalo de velocidades atómicas; por otro, basta con una sola emisión espontánea. Ello lo diferencia de los métodos tradicionales de enfriamiento por láser, que requieren numerosas repeticiones del ciclo de bombeo y emisión, lo cual limita su aplicabilidad a un número reducido de especies atómicas.

Respecto al frenado de partículas mediante una superficie sólida en retroceso, el intento de Mark Raizen de utilizar un rotor mecánico cuenta con precedentes en la historia de la criogenia. En general, cuando un átomo choca contra una pared que retrocede, pierde energía cinética. Puede demostrarse que, si la velocidad de la pared asciende a la mitad de la del átomo, este se detiene por completo. No obstante, el problema de este método reside en que la velocidad de las turbinas ha de ajustarse para que coincida con la mitad de la velocidad de las partículas del haz.

Interesados por el rotor mecánico de Mark Raizen y su grupo, Andreas Ruschhaupt y yo decidimos investigar otras estrategias. En 2009 dimos con un resultado que sorprendía por su sencillez: una pared cuya distancia a la fuente de pulsos de partículas fuese proporcional a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde que se activaba el dispositivo detendría *todas* las partículas del pulso, con independencia de su velocidad inicial. Como demuestra un cálculo elemental, en ese caso todos los átomos chocan contra la pared en el momento en que la velocidad de esta es igual a la mitad de la velocidad de aquellos. El precio que hemos de pagar es la dispersión espacial de las partículas detenidas, lo cual planeamos evitar mediante un diodo atómico colocado frente a la pared, de manera que se cree una trampa móvil que acumule los átomos enfriados.

El método de Mark Raizen para frenar «proyectiles atómicos» con un cañón magnético inverso suscitó también nuestra curiosidad. En particular, nos planteamos lo siguiente: si se lanzase con una determinada velocidad media un proyectil de átomos encapsulados en una trampa gradual y móvil, ¿sería posible diseñar una trayectoria que detuviese los átomos en un momento y localización predeterminados? La respuesta es afirmativa. El desarrollo de la teoría y los experimentos correspondientes constituye en estos momentos el objetivo principal de nuestro grupo de investigación. La solución se basa en suponer primero la dinámica deseada y, a partir de ella, construir las interacciones necesarias. El análisis de los invariantes dinámicos (cantidades que se mantienen constantes durante la evolución de un sistema) facilita este tipo de diseños inversos.

Lo anterior permite acelerar procesos que, de otra manera, habría que realizar con suma lentitud a fin de evitar las excitaciones del sistema. Un análogo macroscópico de la clase de problemas de los que hablamos nos lo proporciona el transporte de un vaso con agua: ¿cómo debemos desplazar el vaso para que alcance una meta predeterminada con el agua finalmente en reposo y sin que se derrame por el camino? Si disponemos de un tiempo ilimitado, una solución pasa por transportarlo muy despacio. Pero ¿y si no? ¿Cómo conseguirlo en el menor tiempo posible?

En física cuántica, ese tipo de procesos muy lentos se denominan adiabáticos (en este contexto, el concepto de adiabaticidad difiere del empleado en termodinámica, donde se asocia a la ausencia de transferencia de calor). Por ello, denominamos a nuestros métodos de diseño de trayectorias rápidas «atajos a la adiabaticidad». Estos pueden aplicarse al lanzamiento, transporte o frenado de átomos e iones, a expansiones y compresiones, o a la preparación de estados atómicos. Todos estos procesos resultan muy comunes en los laboratorios de enfriamiento de átomos, pero realizarlos con demasiada lentitud resulta poco práctico, ya que, en procesos prolongados, las perturbaciones pueden destruir los delicados fenómenos cuánticos que tan a menudo constituyen el principal objeto de estudio de la física de temperaturas ultrabajas.

Gonzalo Muga es catedrático del departamento de química física de la Universidad del País Vasco y coordinador del grupo QUINST (Quantum Information, Science and Technology), en la Red ***tp.lc.ehu.es/qist***

las son lo bastante pequeñas, el enfriamiento con fotones individuales debería disminuir la temperatura hasta el punto en que comenzasen a dominar los efectos cuánticos. Las moléculas se comportarían como ondas deslocalizadas que tomarían parte en reacciones químicas a distancias mucho mayores que las habituales, sin necesidad de la energía cinética que, de ordinario, se requiere para desencadenar una reacción. Algunos grupos de investigación persiguen hoy día este objetivo.

Otra gran ventaja del enfriamiento con un solo fotón reside en que puede aplicarse sobre el hidrógeno y sus isótopos (el deuterio, con un neutrón adicional en el núcleo, y el tritio, con dos neutrones). A finales de los años noventa, Dan Kleppner y Thomas J. Greytak, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, lograron la dificilísima tarea de atrapar y enfriar hidrógeno con métodos criogénicos y enfriamiento evaporativo, pero fracasaron con el deuterio y el tritio. Avances posteriores se basaron en el empleo de un aparato, relativamente sencillo, concebido para enfriar isótopos. Pero el enfriamiento con fotones individuales se adapta a la perfección a los tres isótopos del hidrógeno. Uno de los objetivos consistirá en mejorar los límites de la espectroscopía de precisión ultrafina, otra aplicación de suma importancia.

Atrapar y enfriar tritio quizá permita medir la masa de los neutrinos, las partículas elementales conocidas más abundantes del universo, y comprender mejor los efectos gravitatorios de dichas partículas en la evolución del cosmos. Dado que se trata de un isótopo radiactivo, el tritio se transmuta en helio-3 cuando uno de sus neutrones se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino. Si se mide la energía del electrón, resulta posible determinar la energía del antineutrino (el cual

SEGUNDO PASO

Frío infernal

Después de que un cañón de bobinas atómico u otro dispositivo haya enfriado el gas hasta unas centésimas de grado Kelvin, en la segunda etapa del proceso el gas se enfría hasta una millonésima de grado o menos. La técnica de enfriamiento con fotones individuales lo logra gracias a una puerta de un solo sentido, la cual se inspira en el «demonio de Maxwell», experimento imaginario propuesto por el físico escocés en el siglo XIX. La idea consiste en dejar que la compuerta concentre los átomos en un volumen menor, pero sin elevar su temperatura. Después, al abrir la puerta, el gas se expande de nuevo hacia el volumen inicial y su temperatura desciende aún más.

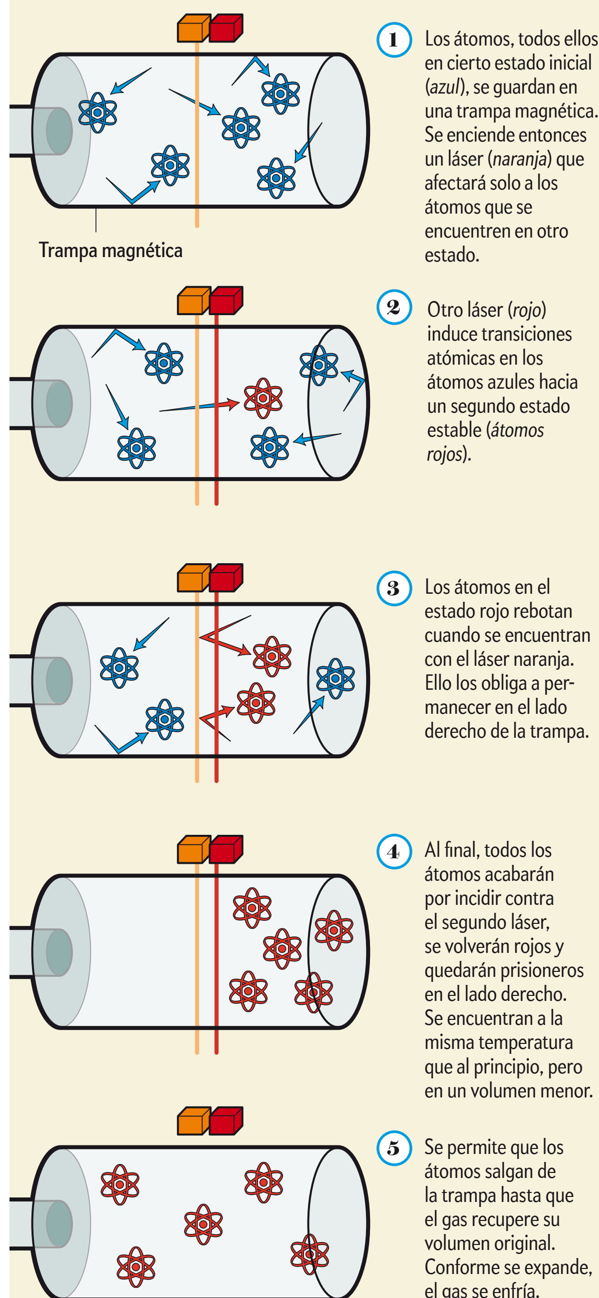


ILUSTRACIÓN DE BROWN BIRD DESIGN

atraviesa los detectores sin dejar rastro) y, con ello, su masa. Los físicos teóricos esperan que la masa de los neutrinos coincida con la de los antineutrinos.

Los mismos métodos también servirán para atrapar y enfriar átomos de antihidrógeno, el cual no se había conseguido sintetizar en cantidades significativas hasta hace muy poco, cuando se logró en el LHC del CERN, el gran acelerador de partículas cerca de Ginebra. Su manipulación requiere una precaución extrema, puesto que se desintegra en energía tan pronto como entra en contacto con la materia ordinaria. Por esta razón, en este caso ha de generarse primero un haz de antihidrógeno lanzando antiprotones a través de una nube de positrones, frenarlo después y enfriarlo con nuestro demonio de Maxwell. Los experimentos con antihidrógeno ultrafrío podrán responder a esta sencilla cuestión: ¿actúa la gravedad sobre la antimateria de la misma manera que sobre la materia?

Las nuevas técnicas de cañón de bobinas y de enfriamiento con un solo fotón servirán también a importantes aplicaciones prácticas. Los isótopos de la mayoría de los elementos aún se separan mediante un dispositivo llamado calutrón, inventado por Ernest Lawrence para el Proyecto Manhattan. Isótopos diferentes poseen masas ligeramente distintas; un calutrón separa los isótopos gracias a un campo eléctrico, de modo similar a como lo haría un gran espectrómetro de masas. El único proyecto sobre calutrones activo hoy día se encuentra en Rusia, pero no destaca por su eficiencia. Un dispositivo basado en nuestro demonio de Maxwell separaría los isótopos que componen un haz de manera mucho más eficiente que los calutrones. Gracias a este método, se podrían obtener pequeñas cantidades de algunos isótopos, como calcio-48 o iterbio-168, los cuales revisten importancia tanto en medicina como en investigación básica. Por otra parte, la técnica no supone riesgo alguno de proliferación nuclear, ya que solo resulta práctica para obtener cantidades ínfimas de isótopos.

Otra aplicación concierne a la fabricación de dispositivos a escala nanométrica. En lugar de emplearse para frenar átomos, los campos magnéticos podrían utilizarse para focalizar haces atómicos, de la misma manera que una lente concentra la luz en un punto, pero con una resolución de un nanómetro o incluso menor. Después, dichos haces servirían para depositar átomos durante los procesos de nanofabricación y conseguir detalles mucho más finos que los que se obtienen con la litografía óptica, la mejor técnica disponible hoy día para elaborar circuitos integrados. La construcción de estructuras nanométricas mediante la adición de átomos uno a uno —en lugar de las técnicas de pulidos sucesivos, más empleadas en la actualidad— dará lugar a un nuevo campo que, en lugar de nanociencia, podríamos denominar «atomociencia».

El cero absoluto seguirá tan inalcanzable como siempre. Pero aún hay mucho por descubrir —y por ganar— en el camino que lleva hasta él.

PARA SABER MÁS

Espectroscopía de gases sobreenfriados. Donald H. Levy en *Investigación y Ciencia*, págs. 58-67, abril de 1984.

Demonios, motores y la segunda ley. Charles H. Bennett en *Investigación y Ciencia*, págs. 60-68, enero de 1988.

Trampa de láser para partículas neutras. Steven Chu en *Investigación y Ciencia*, págs. 54-61, abril de 1992.

One-photon atomic cooling with an optical Maxwell demon valve. A. Ruschhaupt, J. G. Muga y M. G. Raizen en *Journal of Physics B*, vol. 39, n.º 18, pág. 3833, septiembre de 2006.

Versión multimedia del artículo original en: ScientificAmerican.com/mar2011/raizen

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. **ASTRONOMÍA**
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA**
El origen de la vida, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION**
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA**
Fronteras de la física, El tiempo, Fenómenos cuánticos
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA**
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS**
Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA**
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **CIENCIAS AMBIENTALES**
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS**
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. **LUZ Y TÉCNICA**
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo
T-52: El origen de la vida
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 7,00€



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,00€



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

Por cada tramo o fracción de 5 productos	
España: 2,80€	Otros países: 14,00€

Oferta Colección BSA	
España: 7,00€	Otros países: 60,00€

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web: www.investigacionyciencia.es



Scott L. Murchie es geólogo en el Laboratorio de Física Aplicada (APL) de la Universidad Johns Hopkins, donde analiza el espectro de la luz solar reflejada en la superficie de otros planetas para desentrañar su estructura e historia.



Ronald J. Vervack, Jr. trabaja también en el APL. Investiga las atmósferas planetarias, los cometas y asteroides en diferentes longitudes de onda.



Brian J. Anderson, también del APL, es especialista en campos magnéticos planetarios, magnetosferas y plasma espacial.

ASTROFÍSICA

Viaje al planeta más cercano al Sol

Nunca antes una sonda espacial había orbitado alrededor de Mercurio. El pasado mes de marzo se logró por primera vez

Scott L. Murchie, Ronald J. Vervack, Jr. y Brian J. Anderson

Como reza el chiste, lo único peor que encontrar un gusano en una manzana es encontrar medio. Los planetólogos experimentaron algo similar el 29 de marzo de 1974, cuando la sonda *Mariner 10* sobrevoló Mercurio y permitió a la humanidad asomarse a ese diminuto mundo infernal. Entre otros hallazgos, la misión descubrió uno de los mayores cráteres de impacto del sistema solar, que más tarde recibiría el nombre de Caloris. Sin embargo, sus fotografías solo llegaron a retratar la mitad del cráter; la otra mitad se hallaba sumida en la oscuridad. Y esa no fue la única omisión: entre aquella visita y los dos sobrevuelos posteriores, en 1974 y 1975, la *Mariner 10* fotografió menos de la mitad de la superficie del planeta.

Habría que esperar 34 años para poder observar el cráter iluminado en su totalidad. Entonces resultó aún más impresionante de lo que las imágenes anteriores habían sugerido. El 14 de enero de 2008, la sonda espacial *MESSENGER* (del acrónimo en inglés para Superficie, Entorno Espacial, Geoquímica y Reconocimiento de Mercurio) sobrevoló Mercurio. Caloris aparecía casi en el centro de la primera toma que la sonda envió a la Tierra. Cuando nuestra colaboradora Nancy Chabot nos la mostró, todos lo celebramos. Aunque no por mucho tiempo, ya que entonces comenzamos una acalorada discusión acerca de qué era exactamente lo que estábamos viendo. Parecía un negativo de la Luna. A pesar de que la superficie de Mercurio también presenta numerosos cráteres y recuerda a la de nuestro satélite, los cráteres lunares contienen lavas de color oscuro. En cambio, el interior de Caloris exhibe planicies de color claro, una diferencia aún no muy bien entendida.

El pasado mes de marzo, la sonda *MESSENGER* hizo lo que la *Mariner 10* no consiguió en su momento: entrar en órbita alrededor de Mercurio. Gracias a ello, ahora estudiará en detalle el planeta interior más desconocido. Su paisaje y la variación de su brillo suponen solo dos de sus enigmas. Lanzada en 2004, la sonda *MESSENGER* ha sido diseñada para dar respuesta a seis grandes preguntas: ¿Cuál es la composición de la superficie de Mercurio? ¿Cómo transcurrió su historia geológica? ¿Cómo puede un planeta tan pequeño poseer un campo magnético global? ¿Se encuentra fundido su núcleo metálico? ¿A qué se deben las manchas reflectantes al radar situadas en los polos? ¿Qué procesos gobiernan su delgada atmósfera? La sonda *MESSENGER* debería completar lo que la *Mariner 10* dejó a medio hacer.

EN SÍNTESIS

Mercurio desconcierta a los planetólogos. Apenas un 50 por ciento mayor que la Luna, exhibe, al igual que la Tierra, un campo magnético global. Y aunque su superficie presenta un alto número de cráteres de impacto, registra una actividad geológica relativamente joven.

En 2008 y 2009, la sonda *MESSENGER*, de la NASA, llevó a cabo los primeros vuelos sobre Mercurio desde mediados de los años setenta. Fotografió un hemisferio que no había sido observado en detalle con anterioridad y detectó un plasma inesperadamente turbulento.

El pasado 18 de marzo, la sonda entró finalmente en órbita alrededor de Mercurio y comenzó su misión, la cual se prolongará durante un año. Dada su cercanía al Sol y la alta velocidad orbital del planeta, solo haber llegado hasta allí ya supone un logro.

LLEGAR HASTA MERCURIO

Descenso al Hades

Se necesitaron tres décadas para continuar la misión de la *Mariner 10*. Llegar hasta Mercurio y permanecer allí supone un desafío técnico de enormes proporciones: una sonda espacial en ruta directa desde la Tierra se vería atraída por el intenso campo gravitatorio solar y se aceleraría hasta alcanzar una velocidad 13 kilómetros por segundo más rápida que la velocidad orbital de Mercurio. Un motor de cohete convencional jamás podría decelerar la sonda lo suficiente como para que permaneciese próxima al planeta y comenzase a orbitar a su alrededor. En lo que al coste energético se refiere, Mercurio resulta más difícil de alcanzar que Júpiter, por más que este se encuentre a una distancia muchísimo mayor.

Para lograrlo, la sonda *MESSENGER* hubo primero de sobrevolar la Tierra una vez; Venus, en dos ocasiones, y el propio Mercurio, otras tres veces. Esta maniobra resultó similar a la asistencia gravitatoria empleada para propulsar naves espaciales hacia los planetas exteriores, salvo que, en este caso, la trayectoria se calculó para frenar la nave, en lugar de para acelerarla. A lo largo de seis años y medio, los sucesivos sobrevuelos redujeron su velocidad en 11 kilómetros por segundo.

El motor principal de la *MESSENGER* se encargó del resto. La sonda se encuentra diseñada como si de un depósito de gasolina flotante se tratase, con una estructura ligera dispuesta alrededor de tanques propulsores (1). Cuando fue lanzada, la masa de la nave ascendía a 1100 kilogramos; 600 de ellos eran combustible.

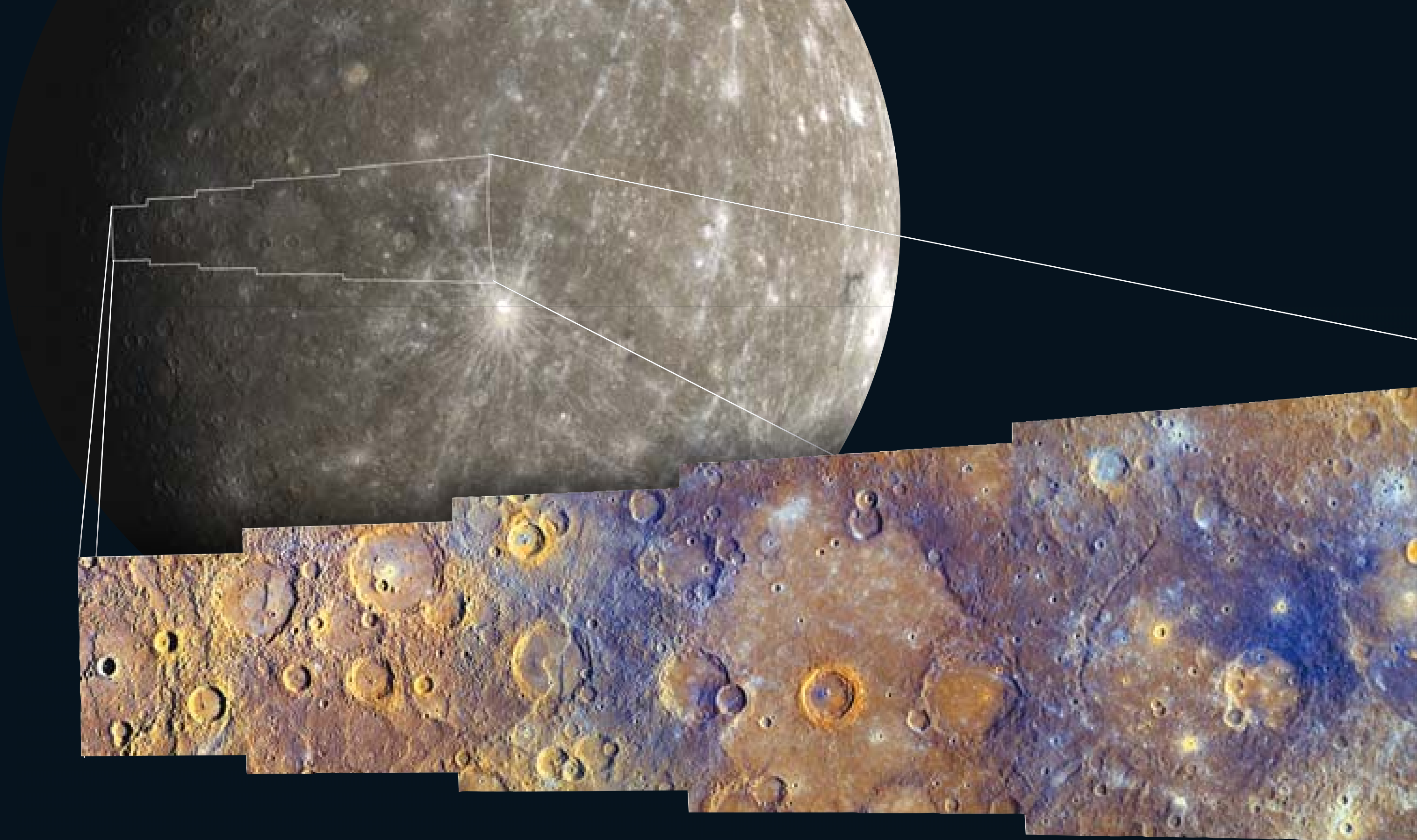
Pero llegar hasta Mercurio no supone sino la mitad de la hazaña. Desde allí, el Sol se muestra once veces más brillante que desde la Tierra; en la superficie del planeta, las temperaturas alcanzan el punto de fusión del zinc. La nave se refugia bajo un parasol (2) tejido con fibras de cerámica. Sin embargo, los paneles solares (3) deben sobresalir del parasol. A pesar de hallarse diseñados para operar a altas temperaturas, deben orientarse bajo un ángulo oblicuo para que solo absorban una pequeña fracción de luz solar y no se sobrecalienten.

Los instrumentos, por su parte, deben apuntar hacia la superficie del planeta. Para soportar temperaturas tan elevadas, la cámara (4) se encuentra sobre 400 gramos de parafina: cuando la nave alcanza un punto bajo de la órbita, la parafina se funde y absorbe calor; cuando se sitúa en una posición más alta o sobre el lado nocturno, solidifica de nuevo.

Por si fuera poco, la lenta rotación del planeta alrededor de su eje añade una dificultad más. Un día solar en Mercurio (desde un amanecer hasta el siguiente) equivale a 176 días terrestres. En consecuencia, a lo largo del año terrestre que durará la misión, numerosos puntos de la superficie solo podrán observarse desde una perspectiva ideal durante escasos y cortos períodos de tiempo.



ILUSTRACIONES DE DON FOLEY (*MESSENGER*) Y JEN CHRISTIANSEN (*esquema de la trayectoria*); FUENTES: NASA/LABORATORIO DE FÍSICA APLICADA DE LA UNIVERSIDAD JOHNS HOPKINS/INSTITUTO CARNEGIE DE WASHINGTON



LA CORTEZA

No tan muerta como parece

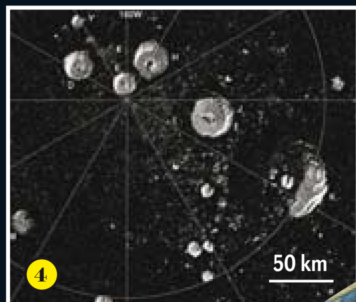
Con anterioridad a la sonda *Mariner 10*, algunos expertos daban por hecho que, tal y como ocurre con la Luna, Mercurio carecería de cualquier fenómeno geológico. Cuando un planeta o satélite pierde su calor interno, su actividad geológica se detiene. La rapidez con la que eso ocurre queda determinada por el tamaño del astro. Los objetos pequeños exhiben una mayor superficie con relación al volumen, razón por la que se enfrían con mayor prontitud. Puesto que Mercurio es tan solo 1,5 veces mayor que la Luna, su historia geológica debería haber seguido una pauta similar. Pero la *Mariner 10* puso en duda tales suposiciones cuando envió imágenes que mostraban vastas superficies planas de aspecto volcánico, si bien no resultaba fácil deducir su origen. En la Luna, las planicies de Cayley también parecían llanuras volcánicas un tanto inusuales, pero cuando los astronautas del *Apolo 16* alunizaron, tan solo hallaron derrubios eyectados desde un cráter de impacto.

Jamás nos imaginamos que la *MESSENGER* zanjaría el asunto con la rapidez con la que lo hizo. La sonda ha detectado huellas que revelan con claridad la existencia de lavas de distintos colores y composiciones, así como la de erupciones piroclásticas pasadas, similares a las del volcán Santa Helena. Así lo demuestra el realce por ordenador de las variaciones de color (*arriba*). En las áreas bajas del interior de los cráteres, se aprecian materiales suaves con diferencias de color muy marcadas. Los cráteres más jóvenes y de menor tamaño han excavado materiales multicolores a varias profundidades. Tales imágenes ponen de manifiesto que los kilómetros superficiales de la corteza de Mercurio se componen de depósitos volcánicos.

Al trazar la frontera de las regiones que comparten formaciones y colores comunes, los investigadores han elaborado el primer mapa geológico de Mercurio de la era *MESSENGER* (*derecha*). En torno al 40 por ciento de la superficie —que comprende el interior del cráter de impacto Caloris (1)— presenta planicies suaves, muchas de las cuales poseen probablemente un origen volcánico (*sombras marrones*). Las zonas grises entre las superficies planas contienen un mayor número de cráteres y se antojan más antiguas (2). Una diferencia notable con respecto a la Luna y Marte procede de la distribución de estas llanuras suaves. En la Luna, se concentran en su cara visible; en Marte, se sitúan sobre todo en el hemisferio norte. Sin embargo, las de Mercurio se distribuyen sobre todo el planeta. La más reciente quizá se remonte a mil años de antigüedad, una edad joven en comparación con el estándar lunar o marciano.

Los investigadores siguen intentando dilucidar el significado de las regiones azuladas que cubren el 15 por ciento de la superficie, como el cráter de Tolstoi (3). Esas áreas podrían contener óxidos de hierro y titanio, que los impactos habrían desenterrado de las profundidades, pero también podría tratarse de materiales volcánicos más antiguos, los cuales habrían aflorado sobre lavas jóvenes, de color claro.

Las imágenes que capture la sonda *MESSENGER* desde su órbita gozarán de una resolución al menos tres veces mayor que la de las imágenes tomadas durante los sobrevuelos. Entonces los instrumentos disponían de poco tiempo para las mediciones, pero ahora enviarán datos de mayor calidad. El Espectrómetro de Neutrones y Rayos Gamma se hallará en condiciones de ahondar en un fenómeno que ya fue observado desde la Tierra durante el decenio de los noventa: las regiones polares contienen materiales altamente reflectantes al radar. Los expertos creen que podría tratarse de hielo (4). Puede que algo así sea lo último que cabría esperar en un planeta abrasado por el Sol; sin embargo, algunas regiones próximas a los polos se hallan sumidas de manera permanente en la sombra, por lo que quizá se encuentren lo bastante frías como para capturar el vapor de agua procedente de los impactos de cometas o meteoritos ricos en agua.





FUENTES: NASA/LABORATORIO DE FÍSICA APLICADA DE LA UNIVERSIDAD JOHNS HOPKINS/UNIVERSIDAD DEL ESTADO DE ARIZONA/INSTITUTO CARNEGIE DE WASHINGTON; JOHN HARMON *OBSERVATORIO DE ARECIBO* (*hielo*)

Un misterio magnético

El seguimiento de la trayectoria de la *Mariner 10* permitió estudiar el campo gravitatorio de Mercurio y calcular con mayor exactitud la densidad del planeta. Esta asciende a unos 5,3 gramos por centímetro cúbico, un valor enorme comparado con los 4,4 gramos por centímetro cúbico de la Tierra, los 3,3 de la Luna o los 3 de una roca común. (Estos valores se corrigen para dar cuenta de la compactación causada por la gravedad y permitir así una comparación de las propiedades intrínsecas de los materiales). Bajo la envoltura rocosa de Mercurio ha de subyacer un núcleo denso, constituido sobre todo por hierro. La Tierra también posee un núcleo rico en hierro, pero, en proporción a la masa del planeta, el de Mercurio resulta dos veces mayor. Quizá Mercurio haya poseído antaño una gruesa capa rocosa que fue arrancada después por los impactos, o puede que, al hallarse tan cercano al Sol, el material que dio origen al planeta ya fuese rico en hierro.

Parece muy probable que un núcleo de semejante tamaño guarde una estrecha relación con uno de los hallazgos más sorprendentes: la existencia de un campo magnético global. A grandes rasgos, el campo magnético de Mercurio es dipolar, como el de un imán. Si bien en la superficie del planeta la intensidad del campo asciende al uno por ciento de la del campo magnético terrestre, el mero hecho de que Mercurio posea un campo dipolar ya resulta significativo, por débil que este sea. A excepción de la Tierra y Ganímedes, el satélite de Júpiter, ningún otro cuerpo de superficie sólida presenta un campo de este tipo.

El campo magnético terrestre se debe a la circulación del hierro fundido del núcleo externo, que hace las veces de «dinamo planetaria». El campo de Mercurio, junto a las sutiles variaciones en la velocidad de rotación durante una revolución solar, indica que el núcleo externo no se encuentra solidificado por completo, a pesar de que, a juzgar por su tamaño, debería estarlo. Por algún motivo, Mercurio no ha evolucionado de la misma manera que Marte, que en sus inicios contaba con un campo magnético global que perdió después. Uno de los principales objetivos de la sonda *MESSENGER* consiste en averiguar su origen.

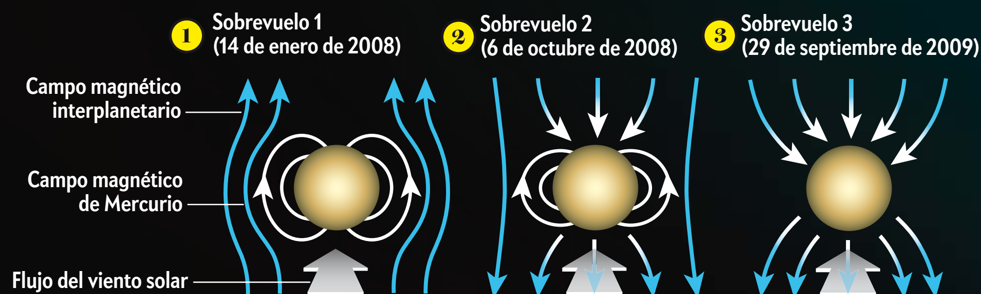
Además de suponer un indicador externo de la dinámica interna del planeta, el campo magnético genera una actividad plasmática muy intensa alrededor de Mercurio: desvía el viento solar (la corriente de partículas cargadas procedente del Sol) y crea una zona en las inmediaciones de Mercurio que queda dominada por el campo del planeta, en lugar de por el campo magnético interplanetario. La sonda *Mariner 10* detectó ráfagas de partículas muy energéticas, similares a las que dan lugar a las resplandecientes auroras terrestres.

La sonda *MESSENGER* ha revelado que la magnetosfera de Mercurio se metamorfosea sin cesar. Durante el primer sobrevuelo, el campo interplanetario se orientaba hacia el norte, alineado con el campo planetario a la altura del ecuador (1), y la magnetosfera se hallaba en un estado quiescente. Durante la segunda visita, sin embargo, el campo magnético interplanetario resultó estar orientado hacia el sur, en sentido contrario al del campo del planeta en el ecuador. Dos campos magnéticos alineados en sentidos opuestos pueden acoplarse mediante un fenómeno denominado reconexión magnética (2), el cual libera gran cantidad de energía y transfiere plasma de una región a otra. En este caso, se inyecta plasma desde el viento solar hacia la magnetosfera de Mercurio. La sonda *MESSENGER* calculó una tasa de reconexión magnética diez veces más intensa que la observada en las proximidades de la Tierra. Durante el tercer sobrevuelo, las observaciones indicaron que las líneas del campo planetario se encontraban distorsionadas en extremo: en cierto momento se hallaban asociadas por completo al viento solar (3) para, cinco minutos después, volver a unir los hemisferios norte y sur del planeta. En Mercurio, una brújula no resultaría de mucha utilidad, puesto que la aguja cambiaría de dirección cada cinco minutos. ¿Qué otras sorpresas deparará la magnetosfera de Mercurio?

Lóbulo norte

Lámina de plasma

Lóbulo sur



PARA SABER MÁS

The evolution of Mercury's crust: A global perspective from MESSENGER. Brett W. Denevi et al. en *Science*, vol. 324, págs. 613-618, mayo de 2009.

The magnetic field of Mercury. Brian J. Anderson et al. en *Space Science Reviews*, vol. 152, n.º 1-4, págs. 307-309, mayo de 2010.

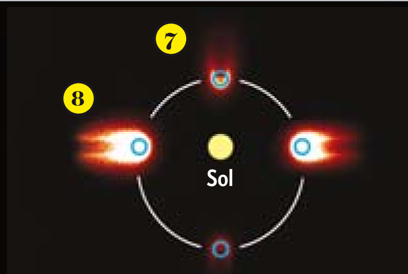
Mercury's complex exosphere: Results from MESSENGER's third flyby. Ronald J. Vervack, Jr. et al. en *Science*, vol.329, págs. 672-675, agosto de 2010.

Luz estroboscópica a cámara lenta

Mercurio no presenta una atmósfera usual, en el sentido de que no se halla envuelto por una capa de aire gruesa. Pero sí posee una exosfera: una «atmósfera» tan tenue que los átomos vagan por ella sin colisionar unos con otros. Los átomos que allí se encuentran proceden de la superficie del planeta y se incorporan a ella mediante varios procesos. La radiación solar extrae átomos de los minerales y sublima los elementos volátiles, como el sodio. Pero los iones procedentes del viento solar y la constante lluvia de micrometeoroides también arrancan átomos de los minerales. Los procesos relacionados con la radiación solar son de energía bastante baja y, por lo general, los átomos que expulsan regresan a la superficie (4). El viento solar y el bombardeo de micrometeoroides resultan más violentos, por lo que los átomos que eyectan permanecen en la exosfera durante más tiempo (5). Algunos de ellos, en particular el sodio, pueden formar una cola similar a la de un cometa por acción de la presión de la radiación solar, que los aleja del Sol y del planeta (6).

Como resultado de una fascinante combinación de factores, la exosfera desprende un brillo que «late» dos veces durante cada órbita. Ello se debe a que los elementos que la componen absorben la radiación solar de una determinada longitud de onda, y reemiten después parte de esa energía en la misma longitud de onda. Sin embargo, dichos elementos también se encuentran en las capas externas del Sol, donde absorben las mismas frecuencias que estimulan las emisiones exosféricas. A pesar de ello, en ocasiones esa radiación acaba llegando hasta Mercurio debido a la gran excentricidad de la órbita del planeta: cuando este se acelera al acercarse o alejarse del Sol, el efecto Doppler modifica el espectro solar de manera tal que la exosfera recibe una mayor cantidad de luz con la longitud de onda necesaria y, como consecuencia, brilla con mayor intensidad. Así, cuando Mercurio se encuentra en el afelio o el perihelio, la exosfera apenas resulta visible (7); por el contrario, brilla en los puntos intermedios de la órbita (8).

A lo largo de este año, la sonda *MESSENGER* observará la exosfera durante sus ciclos orbitales. Y si hemos de guiarnos por lo que hemos visto hasta ahora, Mercurio revelará nuevos fenómenos que aún no hemos llegado a imaginar.



Cúspide norte
6
Envoltura magnética
Magnetopausa
Arco de choque
Corteza
Manto
Núcleo
4
5
Trayectoria de los átomos
Cúspide sur
Viento solar

ILUSTRACIONES DE DON FOLEY (*Mercurio*), JEN CHRISTIANSEN (*esquema del campo magnético*) Y RONALD J. VERVACK, JR. (*esquema de la exosfera*)



Después de hacer crecer las células madre durante 30 días en un medio de cultivo (*rojo*), se convierten en tejido especializado que se utiliza para crear modelos de diversas enfermedades.



GRANT DELIN

MEDICINA

Enfermedades en una placa de Petri

Las células madre procedentes de tejidos adultos podrían impulsar el desarrollo de fármacos para combatir enfermedades debilitantes

Stephen S. Hall

Stephen S. Hall viene escribiendo sobre el encuentro entre ciencia y sociedad desde hace casi tres decenios. Relató la historia temprana de la investigación con células madre en *Merchants of Immortality* (Houghton Mifflin, 2003), libro ganador de varios premios.



El 26 de junio de 2007, Wendy Chung, directora de genética clínica en la Universidad de Columbia, se dirigió al distrito de Queens de la ciudad de Nueva York para hacer una petición sobre un asunto delicado a las matriarcas de una familia croata marcada por la tragedia. Preguntó a las dos hermanas, de 82 y 89 años de edad, si aceptarían donar algunas de sus células cutáneas para realizar un experimento ambicioso y de resultado incierto pero que, en caso de tener éxito, prometía una doble recompensa. En primer lugar, aceleraría la búsqueda de tratamientos contra la enfermedad incurable que padecía su familia. En segundo lugar, establecería una nueva y valiosa aplicación de las células madre: a partir de células no especializadas se podrían generar numerosos tipos de células del organismo.

Las hermanas padecían esclerosis lateral amiotrófica (ELA), un trastorno nervioso degenerativo que provoca una parálisis progresiva. También se conoce como enfermedad de Lou Gehrig, en referencia al jugador de béisbol del equipo de los Yankees, diagnosticado con la dolencia en 1939 y fallecido dos años después. La mujer de 89 años mostraba escasos síntomas de la enfermedad, mientras que su hermana de 82 tenía problemas para caminar y tragar.

Aunque la mayoría de los casos de ELA no son hereditarios, el trastorno había asolado a numerosos miembros de esa familia. Los afectados heredaban una mutación asociada a una variante de la enfermedad de evolución más lenta que la versión que sufren la mayoría de las personas con la dolencia. Chung había seguido el rastro de la enfermedad a través de varias generaciones de la familia en Europa y Estados Unidos.

Las ancianas se sometieron a la prueba complacientes. Chung tardó solo un par de minutos en realizar la «biopsia por punción», dos rápidas incisiones en la parte interna del brazo, cada una de ellas de un diámetro de tres milímetros. Las células de las mujeres, junto con muestras de piel de docenas de otros pacientes con ELA y de voluntarios sanos, recibieron más tarde un tratamiento químico para convertirlas en cierto tipo de células madre, las células madre pluripotentes inducidas. A continuación, estas se reprogramaron para obtener neuronas motoras, células que de forma directa o indirecta controlan los músculos del organismo y se ven afectadas en la ELA. Los cultivos tisulares resultantes presentaban los mismos defectos moleculares que habían provocado la ELA en los donantes respectivos. En otras palabras, los investigadores habían recreado la enfermedad en una placa de Petri con un grado de parecido increíble.

Una vez obtenidas las células, los investigadores podían empezar a estudiar con detalle las alteraciones de las neuronas e iniciar ensayos sobre posibles fármacos con efectos beneficiosos en esas células dañadas. Esta aplicación de las células madre es nueva y contrasta con el empleo de las mismas como tratamiento, que hasta ahora ha experimentado, lamentablemente, un lento progreso. De tener éxito, el concepto de «enfermedad en una placa de Petri» podría acelerar la adquisición de conocimientos sobre numerosas patologías y hacer más rápidos y eficientes los ensayos con fármacos para tratarlas. En estos cultivos «hechos a medida» se podría comprobar la eficacia terapéutica y la toxicidad de los medicamentos. Además de la aplicación en la ELA, hoy día se está experimentando con células madre inducidas para crear modelos de docenas de enfermedades, entre ellas la anemia falciforme, otras hemopatías y la enfermedad de Parkinson. Se han creado así células cardiacas que laten de manera irregular y reproducen varias arritmias cardiacas. Las compañías farmacéuticas, que durante mucho tiempo han dudado sobre la viabilidad comercial del estudio de las células madre, empiezan ahora a mostrar más interés, porque la estrategia de la «enfermedad en una placa de Petri» refuerza en varios aspectos el desarrollo industrial de fármacos.

Los primeros resultados del experimento con la ELA se publicaron en 2008. Como en la mayoría de los casos de innovación, el éxito depende no solo de la solidez de la idea, sino del equipo de personas que se reúne para ponerla en marcha. En este caso, además de Chung, se contaba con la participación de Lee L. Rubin, director de medicina translacional en el Instituto de Células Madre en Harvard y antiguo investigador en la industria biotecnológica, y con Kevin C. Eggan, especialista en células madre de Harvard y colaborador de Christopher E. Henderson y otros expertos en neuronas motoras de la Universidad de Columbia.

UNA NUEVA APLICACIÓN DE LAS CÉLULAS MADRE

Las células madre utilizadas en estos estudios no deben confundirse con las células madre embrionarias, las que proceden de embriones en sus primeras etapas de desarrollo. Hace una docena de años, el grupo de James A. Thomson, de la Universidad de Wisconsin-Madison, sorprendió a todo el mundo con la noticia de que había creado células madre embrionarias humanas en un laboratorio. Esas células primordiales poseían la capacidad de autorrenovarse indefinidamente y la versatilidad para convertirse en cualquier tipo celular del organismo. La posibilidad de emplear esas células para crear trasplantes «a la car-

EN SÍNTESIS

Todavía a la espera: Las células madre procedentes de embriones albergan la promesa de tratar enfermedades incurables; sin embargo, todavía no se han realizado grandes progresos en las terapias basadas en células madre.

Una nueva idea: En vez de centrarse en los tratamientos, algunos científicos creen que, de momento, las células madre resultan más apropiadas para descubrir fármacos e investigar el modo en que diversas enfermedades dañan el organismo.

Un enfoque original: Hasta hace poco, las células madre necesarias para explorar esta idea se obtenían a partir de embriones. Pero en 2007 se logró reprogramar células humanas adultas para que se convirtiesen en células madre.

Células madre a la medida: Se están utilizando estas células reprogramadas para recrear y estudiar diversas enfermedades en una placa de Petri. Posteriormente, se ensayan posibles fármacos en las muestras de tejido remodeladas.

ta» en numerosas dolencias, desde la enfermedad de Parkinson hasta la diabetes, seducía a los médicos, a los investigadores, a la población general y, sobre todo, a los pacientes con enfermedades incurables.

Pero entonces se hicieron patentes dos crudas realidades. En primer lugar, un sonado debate público en torno a la ética de la investigación con células madre politizó la ciencia y ralentizó los proyectos; la técnica despertaba inquietud moral porque para obtener las células debían destruirse embriones humanos. Ese debate culminó con la declaración del presidente George W. Bush en agosto de 2001 de que los Institutos Nacionales de Salud restringirían la financiación de los estudios que utilizasen alguna de las pocas líneas de células madre embrionarias ya existentes. Ello impedía en la práctica la generación de nuevas células madre, entre ellas las líneas celulares con una enfermedad específica. Como respuesta, destacados equipos de las universidades de Harvard, Columbia y Stanford, junto con grupos de apoyo a los pacientes (como el Proyecto ELA y la Fundación Células Madre de Nueva York), fundaron laboratorios independientes para seguir investigando con financiación privada. En 2009, la administración Obama relajó la normativa que dirigía la investigación con células madre, pero una sentencia de un tribunal federal en 2010 prohibió de nuevo a los Institutos Nacionales de Salud apoyar los proyectos, lo que sumió al campo en la incertidumbre científica y el caos económico.

El segundo problema fue de carácter científico. Tal y como lo recuerda Valerie Estess, directora científica del Proyecto ELA, se inició una desenfrenada carrera para demostrar que un simple trasplante de células especializadas derivadas de células madre podría funcionar como terapia celular en una serie de enfermedades. «El gran sueño», explica, «consistía en obtener neuronas motoras a partir de células madre y, a continuación, implantarlas en el cerebro o en la médula espinal para que los pacientes sanaran como si tal cosa». Pero los experimentos repetidos realizados en animales no funcionaron. Desde el principio hasta el final las pruebas resultaron un fracaso.

En 2002, el equipo de Thomas M. Jessell y Hynek Wichterle, de la Universidad de Columbia, publicó un trabajo fundamental en la revista *Cell* que describía con detalle los factores y el mecanismo que incitaban a las células madre embrionarias a iniciar la ruta biológica que las convertía en neuronas motoras. Rubin, que se había formado en el campo de la neurología y había sido investigador y ejecutivo científico jefe en Curis, una compañía biotecnológica de Massachusetts, vio en ese trabajo datos prometedores que le sugirieron una aplicación diferente de las células madre. Se dio cuenta de que la creación de una enfermedad en una placa de Petri podría representar un método revolucionario para descubrir fármacos. A diferencia de otros científicos académicos, estaba familiarizado con el desarrollo de fármacos. Cuando trabajaba en el campo de la biotecnología había estudiado una molécula que acabó por convertirse en el lucrativo medicamento contra la esclerosis múltiple: el Tysabri.

Tras conocer los resultados de Jessell y Wichterle, Rubin esbozó un plan de negocio para un nuevo tipo de instituto de células madre, «no uno que se centrase en la terapia celular —algo que interesaba a todos los biólogos que trabajan con células madre— sino en el uso de esas células para descubrir medicamentos», destaca. En aquel momento, las entidades de capital de riesgo no quisieron saber nada del tema. Por tanto, Rubin desarrolló la idea en Curis, y se concentró en la atrofia muscular espinal, una enfermedad de las neuronas motoras infantiles con una patología similar a la ELA. Cuando Curis decidió abandonar el proyecto en 2006, Rubin dejó la compañía biotecnológica y se trasladó al Instituto de Células Madre en Harvard para seguir con la idea de estudiar «enfermedades en una placa de Petri».

Poco después, el biólogo Shinya Yamanaka puso a punto una técnica que acabaría por transformar no solo la ciencia de las células madre, sino la política en torno a su aplicación. En un congreso científico que tuvo lugar en Whistler (Columbia Británica) en marzo de 2006, el científico de la Universidad de Kyoto describió un procedimiento para obtener y «reprogramar» células adultas normales de mamífero. Básicamente, Yamanaka había modificado bioquímicamente las células adultas para que volviesen a un estado similar al embrionario o al de las células madre sin necesidad de utilizar o destruir embriones. Denominó a estas células «células madre pluripotentes inducidas» (CMPI). Un año después, Yamanaka y Thomson, de la Universidad de Wisconsin, publicaron por separado que habían generado CMPI a partir de tejido humano [*véase* «El poder terapéutico de nuestras células», por Konrad Hochedlinger; Investigación y Ciencia, julio de 2010].

Uno de los asistentes al congreso de Whistler era Eggan, experto en reprogramación celular de la Universidad de Harvard. Él mismo se hallaba embarcado en su propia versión del concepto «enfermedad en una placa de Petri». Había puesto en marcha varios proyectos para obtener una célula adulta, hacer que regresara a un estado similar al embrionario y que se replicara, tras lo cual recuperaría las células madre de la colonia resultante. Sin embargo, trataba de crear células parecidas a las embrionarias al «viejo estilo», es decir, mediante la misma técnica de clonación que dio lugar a la oveja Dolly. Eggan extraía el núcleo de una célula adulta (por ejemplo, una célula de la piel) y lo implantaba en un óvulo sin fecundar al que se había extirpado el núcleo. Sin embargo, la clonación resultaba muy ineficaz y también controvertida, si se pretendía reprogramar células humanas, porque había que encontrar mujeres dispuestas a donar sus óvulos para el experimento.

No obstante, mediante la estrategia de Yamanaka, en verano de 2007 el equipo de Eggan consiguió que la técnica de las CMPI funcionase en un ensayo con células humanas. Todo estaba a



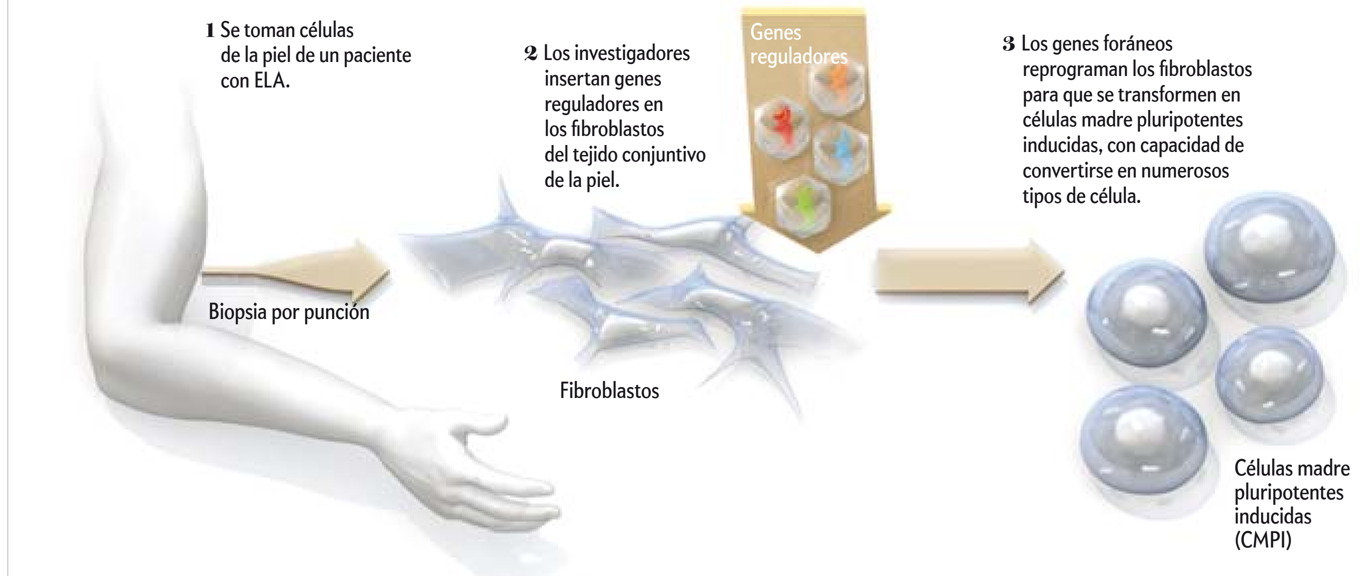
GRANT DELIN

Almacenamiento en frío: **Las biopsias y las células madre se conservan en nitrógeno líquido.**

TRATAMIENTO PERSONALIZADO

Nuevos usos de la piel envejecida

Investigadores de las universidades de Harvard y Columbia extraen tejido de la piel de adultos (*abajo*), aíslan de la muestra unas células especializadas llamadas fibroblastos y, a continuación, las incitan por medio de genes y ciertas sustancias a que se conviertan en células nerviosas.



punto para demostrar el concepto de «enfermedad en una placa de Petri». El grupo de Chung ya había recolectado células de las dos hermanas croatas y de otros pacientes con ELA con la idea de utilizarlas en los experimentos de clonación de Eggan. Gracias a la financiación privada, el Proyecto ELA había creado un laboratorio especial cerca de la Universidad de Columbia, donde los investigadores venían reuniendo líneas celulares de otros pacientes (entre ellas, las hermanas ancianas) desde hacía meses. De repente, la estrategia de las CMPI ofrecía mejores perspectivas de éxito. «Fue un capricho del destino, ya que habíamos tomado muestras cutáneas teniendo en mente un experimento muy distinto», comenta Estess, del Proyecto ELA.

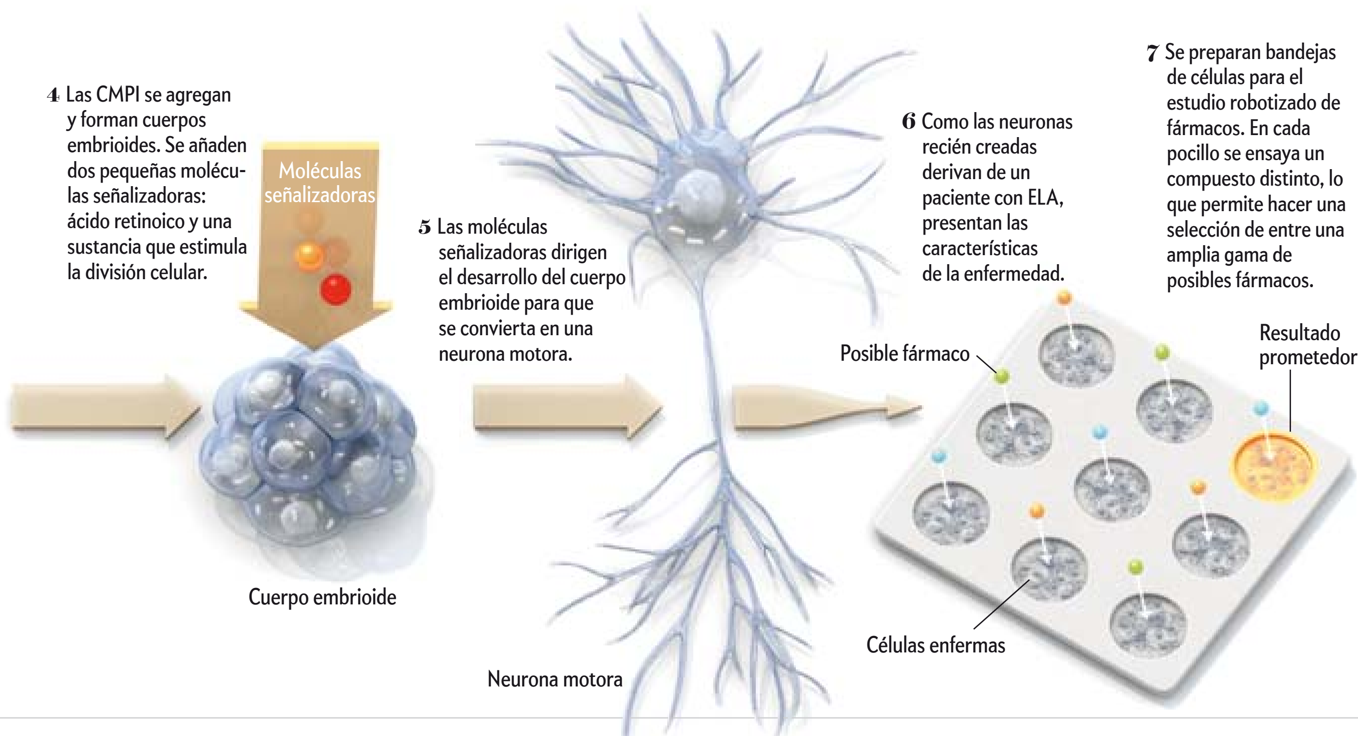
De entre todas las líneas celulares con ELA, la que se haría más célebre procedía de la más joven de las hermanas croatas, identificada como paciente A29. Las células cutáneas de ambas hermanas fueron reprogramadas con éxito en neuronas, pero la edad y el desarrollo de la enfermedad en la paciente A29 permitieron demostrar que la técnica de las CMPI podía generar células que reflejaban una enfermedad grave y de por vida. «Seleccionamos esas muestras porque pertenecían a las personas de mayor edad de nuestro estudio», comenta Eggan. «Queríamos comprobar que se podían reprogramar células incluso de una persona muy anciana que había sufrido la enfermedad durante gran parte de su vida. Se trataba de un caso muy especial».

Los resultados se publicaron el 29 de agosto de 2008 en la revista *Science* y fueron aclamados por la prensa como un hito científico. La idea de utilizar células madre para crear una enfermedad en una placa de Petri prometía el acceso experimental a células que, en otras circunstancias, serían muy difíciles o imposibles de obtener: las neuronas motoras características de la ELA y de la atrofia muscular espinal, las células cerebrales de multitud de trastornos neurodegenerativos o las células pancreáticas típicas de la diabetes juvenil.

CÉLULAS MADRE A LA CARTA

En los últimos dos años, la colaboración entre las universidades de Columbia y Harvard ha producido al menos 30 líneas celulares humanas específicas para el estudio de la ELA, y hay más en camino. Muchas de esas líneas contienen mutaciones únicas descubiertas en personas con casos inusualmente graves de ELA. Y lo que es más importante, la estrategia de la «enfermedad en una placa de Petri» está empezando a dar muestras de su potencial al permitir profundizar en la naturaleza de la alteración en las neuronas motoras. En las células de las dos hermanas se han identificado rutas moleculares que parecen estar implicadas en la muerte de las motoneuronas; esta tiene lugar cuando las células resultan «intoxicadas» por otro tipo de neuronas, los astrocitos. Hoy en día se colocan ambos tipos de neuronas (las motoras y los astrocitos) en una placa de Petri para investigar posibles compuestos terapéuticos que bloqueen la actividad tóxica de los astrocitos o incrementen la supervivencia de las motoneuronas.

En enero de 2010, investigadores del Proyecto ELA iniciaron un estudio preliminar de unos 2000 compuestos para ver si alguno de ellos prolongaba la supervivencia de neuronas motoras humanas portadoras del gen ELA mutado. Ese estudio representaba una nueva estrategia en la búsqueda de fármacos: se empezó por ensayar sustancias que ya habían sido aprobadas por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) para el tratamiento de otras enfermedades. Se albergaba la esperanza de descubrir una molécula que hubiese demostrado ser inocua en humanos y que se pudiese utilizar rápidamente con otros fines, como en la enfermedad motoneuronal. En sus investigaciones paralelas llevadas a cabo en Harvard, Rubin ha identificado casi dos docenas de pequeñas moléculas que interaccionan con una de las rutas recientemente identificadas y aumentan la supervivencia de las neuronas motoras. En la actualidad, la Fundación Atrofia Muscular Espinal está exami-



nando uno de los compuestos en un modelo animal de la atrofia muscular espinal.

Quizás un indicio igualmente revelador de que las CMPI representan una estrategia prometedora en el desarrollo de nuevos fármacos es el hecho de que Rubin ha dejado de llamar a la puerta de las compañías farmacéuticas. Desde que en verano de 2008 los investigadores de Columbia y Harvard establecieron el principio de «enfermedad en una placa de Petri» —la posibilidad de producir neuronas con la misma constitución genética que las de personas enfermas—, las compañías farmacéuticas llaman ahora a la puerta de Rubin. Sin mencionar ninguna en concreto por razones de confidencialidad, el científico subraya el interés de las principales compañías farmacéuticas por el nuevo enfoque. El entusiasmo se ha contagiado a las empresas biotecnológicas: muchos de los que investigan la enfermedad motoneuronal en una placa de Petri, entre ellos Eggan y Rubin, han participado en la puesta en marcha de la compañía biotecnológica iPierian, con sede en California. Junto a otras empresas, como Cellular Dynamics International y Fate Therapeutics, constituye una de las iniciativas para adaptar la tecnología de las CMPI al descubrimiento de fármacos.

Mientras tanto, cada vez más investigadores de células madre adoptan el concepto de «enfermedad en una placa de Petri». Poco después de la publicación sobre ELA de 2008, otro grupo del Instituto de Células Madre de Harvard describió el empleo de la técnica de las CMPI para crear cultivos de células enfermas a partir de pacientes con diabetes juvenil, la enfermedad de Parkinson y otras dolencias. Y a finales de 2008, investigadores de Wisconsin, liderados por Clive N. Svendsen (que después se trasladó al Centro Médico Cedars-Sinai en Los Ángeles), crearon neuronas motoras en una placa de Petri a partir de un paciente con atrofia muscular espinal.

Cuando pregunté a investigadores de Columbia y de Harvard si las dos hermanas croatas eran conscientes de los avances logrados gracias a las células que donaron, nadie parecía saber nada. Pero, por medio de la hija de la paciente A29, quien accedió a hablar siempre y cuando su nombre y el de sus familiares permaneciesen en el anonimato, acabé enterándome de que las hermanas aún vivían. La mayor de ellas, que ahora tiene 93 años, sigue sin mostrar casi ningún síntoma de ELA; de hecho, según su sobrina, todavía «se vale por sí misma, va de paseo a cualquier sitio, hace las compras, cocina, barre y limpia». La menor de las hermanas, la paciente A29, cumplió 85 el pasado junio; a pesar de padecer ELA, se mueve lentamente y con debilidad, y está agradecida por haber tenido la oportunidad de ayudar.

Todavía hoy, la cruel carga de las enfermedades hereditarias sigue acechando y pone de relieve la urgencia que sienten los que se podrían beneficiar de la nueva aplicación de las células madre para descubrir fármacos. «Soy relativamente joven», afirma la hija de la paciente A29, a quien se le diagnosticó ELA en 2002. «Parece que, a medida que transcurren las generaciones, la enfermedad se manifiesta cada vez más pronto. Nos sentimos como en una carrera contra el tiempo. Yo misma tengo una hija adolescente y esa idea supone una pesada carga para la mente y el corazón».

BRYAN CHRISTIE

PARA SABER MÁS

Induced pluripotent stem cells generated from patients with ALS can be differentiated into motor neurons. John T. Dimos *et al.* en *Science*, vol. 321, págs. 1218-1221, 29 de agosto de 2008.

Study says brain trauma can mimic ALS. Alan Schwarz en *New York Times*, 17 de agosto de 2010.

iPS cells: a promising new platform for drug discovery. George Daley en el blog de ciencia e innovación clínica del Hospital Infantil de Boston, 23 de septiembre de 2010: **vectorblog.org/ips-cells-a-promising-new-platform-for-drug-discovery**.

Diseases in a dish take off. Gretchen Vogel en *Science*, vol. 330, págs. 1172-1173, 26 de noviembre de 2010.



Paul C. Sereno es paleontólogo de la Universidad de Chicago. Ha dirigido expediciones a los cinco continentes y ha descubierto unas dos docenas de especies nuevas de dinosaurios. Es también cofundador de Project Exploration, una organización de divulgación científica para jóvenes.

PALEONTOLOGÍA

TRAMPA MORTAL

Los fósiles hallados en una fosa del desierto de Gobi arrojan luz sobre la vida de los dinosaurios

Paul C. Sereno

Nuestro equipo llevaba solo 15 días prospectando en el desierto de Gobi en la Mongolia Interior, pero ya habíamos exhumado un conjunto de fósiles muy bien conservados. «¡Otro esqueleto con un cráneo perfecto!», grité a los miembros del equipo, que se hallaban agachados sobre el suelo del yacimiento desenterrando otros esqueletos. En los años que había trabajado de paleontólogo, nunca había visto nada parecido.

A lo largo de las semanas siguientes emplearíamos cinceles, azadones y máquinas excavadoras para extraer más de una docena de ejemplares de un dinosaurio parecido al avestruz, especie que se convertiría en una de las mejor conocidas de dinosaurios. Pero la historia resultaría mucho más interesante que un simple recuento de huesos fósiles, por muy bien conservados e inalterados que se hubieran mantenido. Ese conjunto de ejemplares revelaría la manera en que esos dinosaurios se relacionaban entre sí, su estructura social y las circunstancias que rodearon su muerte horrible y prematura. Empezábamos a descubrir tan solo los primeros indicios de un accidente sucedido hace 90 millones de años. Poco imaginaba entonces que nuestro hallazgo terminaría haciendo de esa localidad la más rica en una sola especie de dinosaurio que yo haya encontrado nunca.

EN SÍNTESIS

Una expedición al desierto de Gobi, en la Mongolia Interior, ha descubierto un cementerio de 90 millones de años de antigüedad, con restos fosilizados de más de una docena de dinosaurios parecidos a avestruces.

Los hallazgos realizados en ese yacimiento llevan a una conclusión singular: los fósiles de dinosaurios no se depositaron allí a lo largo de milenios, sino que todos los animales murieron al mismo tiempo.

Al estudiar esa fosa común, se ha podido desentrañar la estructura social de los dinosaurios, el modo de interacción entre individuos y la división de trabajo entre adultos y juveniles.



JAMES GURNEY


GURNEY

LA ATRACCIÓN DEL DESIERTO DE GOBI

Los estadounidenses asociamos el descubrimiento de dinosaurios en el Gobi con Roy Chapman Andrews, el baladrón jefe de la expedición del Museo Americano de Historia Natural de la ciudad de Nueva York. En los años veinte del siglo XX, Andrews se aventuró en las regiones desérticas de la Mongolia Exterior y volvió con gran alharaca con los primeros huevos de dinosaurio y *Velociraptor*, una maravilla de garras falciformes. Pero Andrews no fue el único explorador que recorrió el desierto. Por la misma época, el sueco Sven Hedin desenterraba unos fósiles asombrosos en la mitad meridional del Gobi, en la Mongolia Interior, una región que hoy forma parte de China.

En los años transcurridos desde entonces, los que han rastreado las zonas cercanas a los yacimientos de Hedin han hallado nidos de huevos de dinosaurios, junto con los progenitores que los incubaban, y velocirraptores, descubrimientos que rivalizan con los realizados en la Mongolia Exterior. Pero los estudiosos y la atención pública han prestado más atención a la Mongolia Exterior; como resultado, docenas de expediciones paleontológicas internacionales han atravesado la región en todas direcciones desde que esta se abrió a Occidente hace más de un decenio. En cambio, la Mongolia Interior ha permanecido poco explorada [*véase* «Fósiles de Flaming Cliffs», por Michael J. Novacek, Mark Norell, Malcolm C. McKenna y James Clark; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1995].

Cuando visité por primera vez la Mongolia Interior en 1984, en un viaje alrededor del mundo, contaba con 27 años de edad y era estudiante de geología. Era el primer año que China permitía a turistas extranjeros viajar por el país sin un acompañante. Tras llegar en un ferrocarril a vapor a Hohhot, la capital de la región, entonces formada por casas de una sola planta, entré en el museo situado en el centro urbano. Fuera abundaban las rocas del tiempo de los dinosaurios que se distribuían a lo largo de cientos de kilómetros hacia el oeste, flanqueando la fabulosa Ruta de la Seda que unía la estepa mongola con el corazón de Asia Central. Cuando volví a Pekín, visité a Zhao Xijn, profesor del Instituto de Paleontología de Vertebrados y Paleoantropología. Era uno de los más consumados buscadores de fósiles; en aquel entonces ya había descrito más de una docena de nuevas especies. Hablamos de explorar juntos la región en el futuro. Unos 16 años más tarde, la oportunidad y las circunstancias lo hicieron por fin posible.



Acelerar el labrado. Sin este *bulldozer* tomado prestado de un campamento militar cercano, la excavación hubiera tardado meses, no semanas.

MIKE HETTWER

En 2000 volví a Hohhot con Zhao para preparar la logística de una excavación importante en la zona. En la estación de tren fuimos recibidos por Tan Lin, geólogo y director del Instituto Long Hao de Paleontología Estratigráfica de Hohhot. Él nos informó sobre los vehículos y suministros que necesitaríamos para una expedición al desierto de Gobi la primavera siguiente. Afortunadamente, no nos costaría dar con los vehículos adecuados en Hohhot. El pueblo de casas de una sola planta que yo conocía se había convertido en una metrópolis ajetreada con amplias avenidas y destellantes anuncios de neón.

Tan sugirió que volviéramos a visitar las localidades que los descubrimientos de Hedin y de expediciones posteriores hicieron famosas. Sin duda hallaríamos allí nuevos fósiles. Pero yo tenía otra idea: deseaba ir a algún lugar que nadie hubiera explorado antes. Al final, la atracción por lo desconocido salió vencedora: decidimos empezar por la Ruta de la Seda y dirigirnos a las remotas extensiones occidentales del Gobi.

LAS PRIMERAS PISTAS

A mediados de abril de 2001, nos reunimos en Hohhot un equipo de 16 personas compuesto por paleontólogos estadounidenses, franceses, chinos y mongoles. Tras distribuirnos en cuatro vehículos de campo y un camión abarrotado de suministros, emprendimos el viaje de 700 kilómetros a lo largo de las riberas del Huang He (río Amarillo) y en dirección al desierto.

Instalamos nuestro primer campamento base no lejos del minúsculo puesto fronterizo de Suhongtu. El viento del Gobi azotaba nuestras tiendas de campaña del ejército chino, de armazón de hierro, y cubría de arena y polvo todo lo que había en su interior. Salíamos cada día en busca de pruebas interesantes que pudieran asomar entre las rocas, andando varios kilómetros sobre terreno desigual. Cuando de la búsqueda de fósiles se trata, la suerte ayuda; pero lo mejor es estar dotado de un talento natural para «husmearlos».

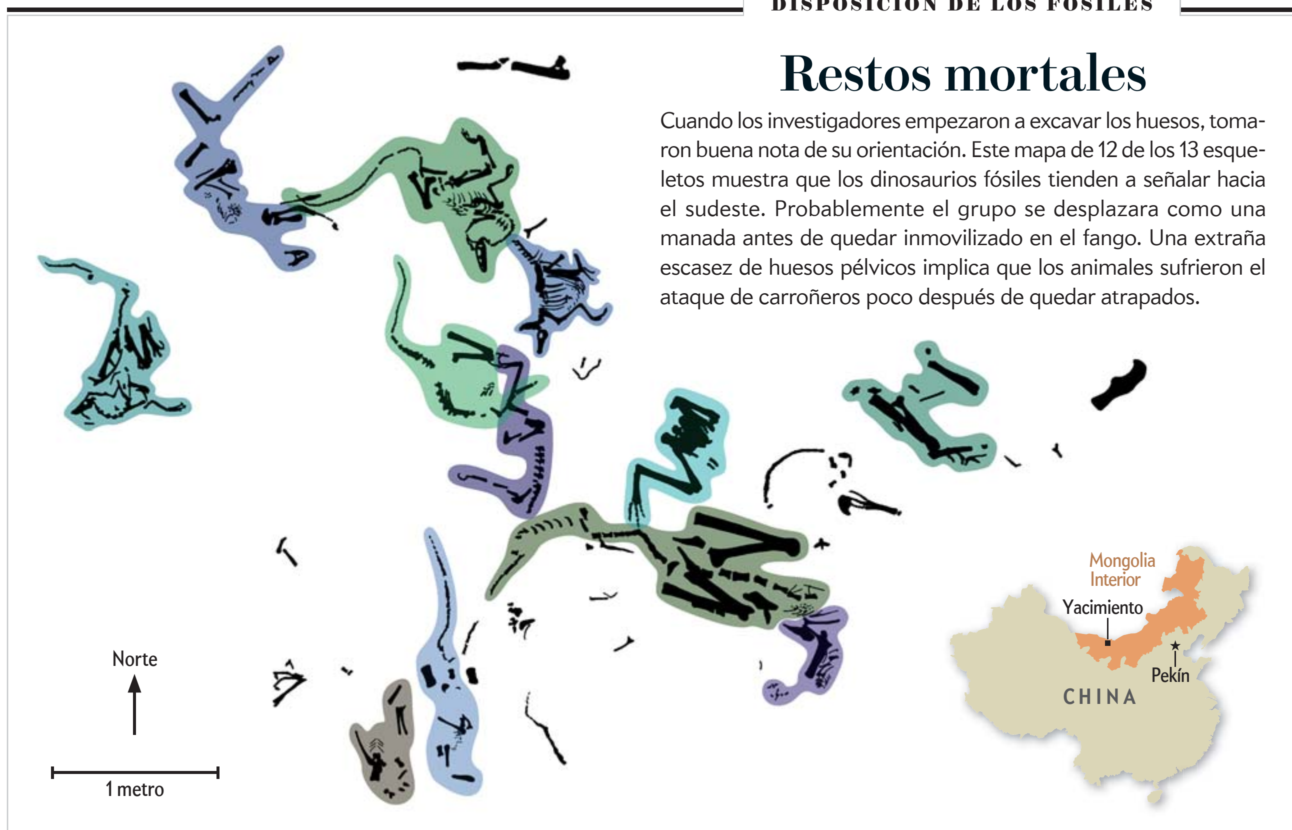
Dave Varricchio, paleontólogo de la Universidad estatal de Montana, realizó el primer hallazgo importante: una huella de un pie de tres dedos en la parte inferior de una laja de roca situada a poca altura. La huella, notable por sus dedos laterales cortos, resultaba pequeña para un dinosaurio, aunque su tamaño superaba al de una mano humana. Dedujimos que probablemente pertenecía a un ornitomímido («imitador de aves») de grandes dimensiones. Pronto no cabría ninguna duda acerca del origen de la huella.

La edad de la región donde se situaba el campamento correspondía al Cretácico tardío (hace unos 90 millones de años), según un mapa geológico chino publicado unos 25 años antes. Aparte de la huella, nuestros hallazgos se limitaban a huesos de dinosaurios pequeños que ya se habían identificado antes en el Gobi. De modo que decidimos desplazarnos a un amplio valle cercano, más rico en fósiles. Muy pronto, diversos miembros del equipo desenterraban allí varios huesos, entre ellos lo que quizás era un cráneo de dinosaurio de pico de pato que sobresalía de la superficie. Otro fósil parecía pertenecer a un pequeño saurópodo, los herbívoros de cuatro patas que alcanzaban un tamaño enorme.

Nos llamó especialmente la atención una pared vertical de roca, con estratos de color rojo y azul, salpicada de huesos de extremidades de varios dinosaurios pequeños. Observamos que no se trataba de una pared natural. Labrada a cincel y a pico, repre-

Restos mortales

Cuando los investigadores empezaron a excavar los huesos, tomaron buena nota de su orientación. Este mapa de 12 de los 13 esqueletos muestra que los dinosaurios fósiles tienden a señalar hacia el sudeste. Probablemente el grupo se desplazara como una manada antes de quedar inmovilizado en el fango. Una extraña escasez de huesos pélvicos implica que los animales sufrieron el ataque de carroñeros poco después de quedar atrapados.



DE «MUD-TRAPPED HERD CAPTURES EVIDENCE OF DISTINCTIVE DINOSAUR SOCIALITY», POR DAVID J. VARRICCHIO ET AL., EN *ACTA PALAEONTOLOGICA POLONICA*, VOL. 53, N.º 4, 2008 (*mapa de esqueletos*)

sentaba la pared posterior de un yacimiento fosilífero. Alguien había explorado la zona antes que nosotros.

Tan explicó que la localidad había sido descubierta en 1978 por un geólogo, antiguo condiscípulo suyo, durante una exploración cartográfica. «Mira aquí», me dijo, señalando un símbolo en forma de un pequeño hueso en el mapa geológico. Con la ayuda de ese mapa, Tan había guiado en 1997 una expedición sino-nipona-mongola hasta esa localidad. Al agotar el tiempo y los materiales, habían recolectado numerosos esqueletos pero no habían podido llevar hasta el fin la excavación.

En mi mochila guardaba un artículo de 1999 sobre un nuevo ornitomímido del Gobi, escrito por un joven paleontólogo japonés, Yoshitsugu Kobayashi, en aquella época estudiante de la Universidad Metodista del Sur. Me di cuenta entonces de que el artículo se basaba en hallazgos del yacimiento que tenía ante mí. El grupo de Kobayashi había advertido la abundancia de fósiles y su conservación excepcional; algunos de ellos contenían incluso piedras estomacales, guijarros que los antiguos saurópodos ingerían para ayudar a triturar el alimento y facilitar la digestión (como hacen hoy los caimanes, focas y aves). En 2003, Kobayashi denominaría a este dinosaurio *Sinornithomimus dongi*. Pero algunos enigmas perduraban: ¿Por qué se conservaban tantos fósiles en un área reducida? ¿Murieron todos los ejemplares al mismo tiempo o a lo largo de milenios? Y si perecieron todos de golpe, ¿cuál fue la causa de ello?

El yacimiento se ubicaba en la base de una colina rocosa en una región del Gobi desolada y azotada por el viento. El horizonte se había vuelto pardo grisáceo, un aviso de que una tormenta de arena se acercaba. En el desierto, estas previsiones se miden en minutos, no en horas. Corrimos hasta los vehículos todoterreno, con la esperanza de regresar en poco tiempo al campamento mientras todavía se pudieran distinguir las rodadas que habíamos dejado en el camino de ida.

LA TRAMPA MORTAL

Durante las semanas siguientes regresamos cada día a aquel valle. Muchos de nosotros intentábamos desentrañar el misterio del yacimiento de ornitomímidos. Los hallazgos de esqueletos se sucedían uno tras otro a medida que nuestras herramientas hacían retroceder la pared posterior del yacimiento hacia el interior de la colina. Otros estudiaban y muestreaban la pared anterior y realizaban un detallado inventario de las rocas que sepultaban el conjunto de fósiles.

Cuando en un lugar se conservan múltiples ejemplares de una especie, el paleontólogo debe preguntarse si esa acumulación es natural. En otras palabras, ¿correspondía nuestro hallazgo a una familia o rebaño que se había congregado en aquel sitio, como quizás hiciera otras veces, y fue sorprendido por la muerte? La mayoría de las acumulaciones óseas de una sola especie no despiertan por lo general tanto interés. Suelen estar compuestas por individuos no relacionados entre sí que, a lo largo de un período de tiempo desconocido, murieron cerca de una poza de agua o fueron arrastrados hasta allí por una inundación.

Si recolectábamos con rapidez los esqueletos restantes, corríamos el riesgo de destruir una información importante (esto es, la manera en que perecieron los dinosaurios). Los datos sobre la causa, las circunstancias y el momento de la muerte no residen solo en los propios fósiles, sino también en la posición de los esqueletos, la presencia de marcas de dientes o huesos astillados, y el carácter del sedimento que se depositó antes, durante y después de la muerte. Debíamos considerar el yacimiento como una «escena del crimen», no como una colección de trofeos paleontológicos.







MIKE HETTWER

Pronto empezamos a sospechar que todos los animales habían fallecido al mismo tiempo. Los esqueletos no estaban distribuidos al azar, sino que parecían señalar en la misma dirección. La disposición podía deberse al arrastre hacia el lugar de múltiples grupos de huesos provocado por una inundación o un río, pero ninguna prueba indicaba tal desplazamiento: todos los esqueletos aparecían intactos.

Además, la roca de finas capas rojas y azules de la pared anterior del yacimiento indicaba que aquella zona había estado formada por fango y limos de grano fino. Observamos algunos puntos en la roca con grietas rellenas, lo que indicaba que aquella región había atravesado períodos húmedos y secos. Minúsculos caparazones planos de concostráceos, animales dulceacuícolas, cubrían algunos de los esqueletos, lo que apuntaba a la existencia en el pasado de un lago en expansión. Cerca de los esqueletos, el fango era muy homogéneo, sin las madrigueras de gusanos y las raíces propias de un suelo que sustentara vida vegetal. En su conjunto, las rocas alrededor de los esqueletos indicaban el flujo y reflujo de un antiguo lago, un oasis en una región seca.

El conjunto de fósiles representaba un descubrimiento sin precedentes. Constituía entonces, y todavía hoy, la única muestra de una especie de dinosaurio conservada de modo parecido a los habitantes de Pompeya. A medida que avanzaban las operaciones de extracción, dedicábamos muchas horas a imaginar los posibles escenarios de la muerte. ¿Perecieron los dinosaurios a causa de la erupción de un volcán cercano o sucumbieron ante una inundación repentina? «Tal vez quedaran simplemente atrapados en el fango», sugería Gabrielle Lyon mientras reseguía con una aguja de joyero los dedos cerrados del pie de un dinosaurio caído. A mí, la idea de una trampa de fango me parecía poco verosímil. Aunque era una excavadora experta, Lyon se dedicaba a la enseñanza, no a la paleontología o la geología. Los animales actuales, como las vacas, mueren a veces cerca de pozas de agua: quedan atrapados en el fango hasta las rodillas y acaban falleciendo de sed, de exposición al sol y de hambre. Pero resulta muy raro que rebaños enteros perezcan de esta manera; aunque según Varricchio, el experto de la expedición en tafonomía (la ciencia de la muerte y la fosilización), los caballos salvajes a veces mueren así.

A medida que excavábamos íbamos acumulando pruebas. Dave advirtió en la pared anterior del yacimiento, cerca del horizonte que conservaba los esqueletos, patrones en forma de V. Las capas de fango aparecían deformadas hacia abajo, como si hubieran sido atraídas por el paso de un objeto delgado, como la garra de un dinosaurio. ¿Se trataba de indicios de una lucha contra la muerte en el barro?

Lamentablemente, nuestra excavación no podía prolongarse durante mucho más tiempo. El yacimiento de ornitomímidos se inclinaba hacia el interior de la colina, lo que complicaba cada vez más la extracción de material nuevo. Una excavación completa con las herramientas de que disponíamos tardaría meses, si no años. Gracias a la colaboración de los oficiales de un campamento militar próximo, a los pocos días pudimos contar con una máquina excavadora gigante para proseguir con nuestro trabajo.

A medida que la pala retiraba la parte superior de la colina, unos pocos centímetros cada vez, intentábamos identificar los fósiles que pudieran aparecer sobre el cementerio de dinosaurios. «¡Alto!», gritó Jeff Wilson, que se inclinaba sobre un bloque que la enorme pala había levantado. Paleontólogo de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, Wilson había reconocido algunas mandíbulas y dientes. Atacamos con los picos los derrubios a cada lado de la última pasada de la excavadora hasta que encontramos todos los fragmentos que faltaban. Encajado en aquella concreción, situado sobre el cementerio a una altura de solo un cuerpo humano, se hallaba el cráneo, de unos 45 centímetros, de un depredador desconocido.

Al cuarto día, la excavadora había retirado toda la colina y su pala había alcanzado la parte superior de la fosa. Reemprendimos la excavación hasta que desenterramos el último de 13 individuos. Por lo general, los esqueletos se desploman sobre una superficie plana antes de quedar enterrados en unos pocos centímetros de sedimento; sin embargo, a medida que extraíamos la fangolita (esquisto de fango) del horizonte principal que contenía los esqueletos, observamos que las patas posteriores de varios dinosaurios se hundían profundamente en el sustrato rocoso. Algunos esqueletos, por lo demás bien conservados, carecían de los huesos de la cadera. Pare-





Escenas de una excavación (*de izquierda a derecha*): **Dave Varricchio busca huesos pequeños; el autor ataca con un pico la dura roca del Gobi; el equipo rastrea los restos que ha dejado el paso de la excavadora; el equipo se refugia ante la llegada de una tormenta de arena; un brazo de *Sinornithomimus* engastado en la roca.**

cía como si los animales hubieran quedado inmovilizados en el fango, y más tarde hubieran llamado la atención de antiguos carroñeros.

Era lo que cabría esperar si un rebaño de dinosaurios que se desplazara hubiera quedado atrapado en la ribera fangosa. La hipótesis de Lyon se dibujaba, pues, como el escenario más probable de la muerte de los animales.

EN LA VIDA Y EN LA MUERTE

De vuelta a la Universidad de Chicago, mi equipo procedió a la limpieza de cada uno de los esqueletos bajo el microscopio, lo que nos permitió descubrir la notable conservación de los restos. No solo se recuperaron piedras estomacales, sino que se identificó lo que parecía una molleja en la que antaño se pulverizarían las plantas. También descubrimos una fina película de carbono negro que recubría ambos lados de la molleja. El material negro representaba los restos de la última comida de los dinosaurios.

Nuevas pruebas ayudaron a confirmar una de las corazonadas que tuvimos durante la excavación. En el desierto nos habíamos dado cuenta de que todos los esqueletos del yacimiento correspondían a animales inmaduros. En el campo, la mejor manera de conocer la edad de un dinosaurio consiste en examinar los huesos de la columna vertebral. Cada vértebra está constituida por un hueso inferior en forma de carrete (el centro) y una estructura curvada superior (el arco neural). La fusión completa de ambas partes indica que la vértebra ha dejado de crecer y el dinosaurio ha alcanzado la edad adulta. En Suhongtu, todos los esqueletos recolectados presentaban las vértebras divididas en dos partes.

Pero ese rasgo proporcionaba solo una estimación tosca de la edad de los dinosaurios. En Chicago, cortamos huesos en secciones finas para contar sus anillos de crecimiento anual, igual que haríamos con un árbol. Descubrimos que los esqueletos pertenecían a animales de entre uno y siete años de edad, la mayoría de ellos de entre uno y dos años. Ese dato nos permitió extraer dos conclusiones. La primera, que *Sinornithomimus* necesitaba unos 10 años para alcanzar la madurez. La segunda, que el rebaño de Suhongtu estaba formado por animales inmaduros, jóvenes dinosaurios que se desplazaban en manada.

Con esta información pudimos reconstruir la historia de aquellos dinosaurios, no solo la manera en que murieron, sino también su forma de vida. Los paleontólogos han especulado sobre los hábitos sociales de los dinosaurios inmaduros, pero el rebaño de Suhongtu proporciona hasta la fecha las mejores pruebas a ese respecto. Debido a que *Sinornithomimus* tardaba cerca de un decenio en alcanzar la madurez, los juveniles tenían muchas oportunidades de congregarse. Los adultos se hallaban atareados con toda una serie de actividades durante la estación reproductora: cortejo, construcción de nidos, defensa del nido, incubación y alimentación de las crías salidas del huevo. Mientras tanto, parece que los juveniles vagaban libremente, valiéndose por sí mismos.

Este grupo concreto encontró una muerte prematura. Para un rebaño que se desplazaba, la trampa de fango habría ofrecido el mismo aspecto que otras muchas zonas próximas a la orilla del lago. El barro bien pudiera haber registrado una huella en lugar de tragarse un pie. Una pareja de esqueletos centrales captaba de manera dramática la tragedia de hace 90 millones de años. Los dos animales quedaron atrapados y su cuerpo se desplomó lateralmente sobre la superficie, uno encima de otro, con las patas profundamente ancladas en el fango. Sus esqueletos se hallaban muy bien conservados, con excepción de los huesos de las caderas, que debieron ser arrancados por carroñeros hambrientos. Un hueso de la cadera aislado ayudó a confirmar esa idea: la porción central de su pala estaba aplastada por el peso del dedo de un intruso.

Después, el nivel del agua ascendió, al menos brevemente, y poco a poco los cuerpos de los dinosaurios y su calamitosa historia quedaron sellados en el fango.

PARA SABER MÁS

Herbivorous diet in an ornithomimid dinosaur. Y. Kobayashi, J. C. Lu, Z. M. Dong, R. Barsbold, Y. Azuma e Y. Tomida en *Nature*, vol. 402, págs. 480-481, 2 de diciembre, 1999.

Mud-trapped herd captures evidence of distinctive dinosaur sociality. D. J. Varricchio, P. C. Sereno, X. Zhao, L. Tan, J. A. Wilson y G. H. Lyon en *Acta Palaeontologica Polonica*, vol. 53, n.º 4, págs. 567-578, 2008.

Expedición Dinosaurios 2001 del Project Exploration: **www.projectexploration.org/mongolia**

Dietrich Lemke fue responsable de los proyectos espaciales del Instituto Max Planck de Astronomía en Heidelberg. Se inició en la astronomía espacial con el desarrollo del telescopio de globo THISBE y su empleo para programas de observación en el ultravioleta y el infrarrojo cercano.



TÉCNICAS OBSERVACIONALES

Astronomía en globo, ayer y hoy

Ya en 1874, dos investigadores se elevaron a una altitud de casi 8000 metros para efectuar observaciones astronómicas desde un globo aerostático. Desde entonces, los telescopios a bordo de globos han permitido explorar el cielo en casi todas las regiones del espectro

Dietrich Lemke

La astronomía de superficie adolece de una serie de limitaciones. A fin de evitar las perturbaciones causadas por la atmósfera, una solución consiste en emplear un globo aerostático para emplazar los telescopios a altitudes de 30 o 40 kilómetros. A tales cotas, cuando se ha dejado atrás el 99 por ciento de la atmósfera, se obtienen imágenes muy nítidas y con una resolución de en torno a una décima de segundo de arco. Aparte de la luz visible, la mayoría de las regiones del espectro electromagnético comienzan a ser accesibles solo desde la estratosfera. Así ocurre con el ultravioleta intermedio o con los rayos X y gamma. Lo mismo sucede con casi todo el espectro infrarrojo (la radiación térmica emitida por los objetos fríos), pues a esa altitud se evita el vapor de agua, que absorbe en dicha longitud de onda. También desaparecen las emisiones térmicas de la atmósfera, las cuales limitan la sensibilidad de los instrumentos.

INICIOS AVENTUREROS

En 1782, Joseph Michel Montgolfier y su hermano Jacques Étienne lanzaron al aire bolsas de papel que antes habían llenado con «aire inflamable», el nombre que por entonces aún se daba al hidrógeno. Los primeros vuelos no duraron demasiado, pues el gas escapaba con rapidez. Los inventores buscaron otro gas «más ligero que el aire», el cual obtuvieron quemando paja húmeda. En su opinión, el humo así generado mostraba una fuerza ascensional particular, la cual mejoraron al alimentar el fuego con zapatos usados. Los hermanos Montgolfier, quienes supusieron que habían creado un gas aerostático especial, habían fabricado así el primer globo de aire caliente.

Los inicios: En marzo de 1874, los aeronautas franceses Théodore Sivel y Joseph Crocé-Spinelli llegaron con un globo a una altura de 7300 metros. Se proponían investigar, con un espectrómetro de mano, las líneas espectrales del Sol.

COLECCIÓN AUDOUIN DOLLFUS/COLOR: STERNE UND WELTRAUM

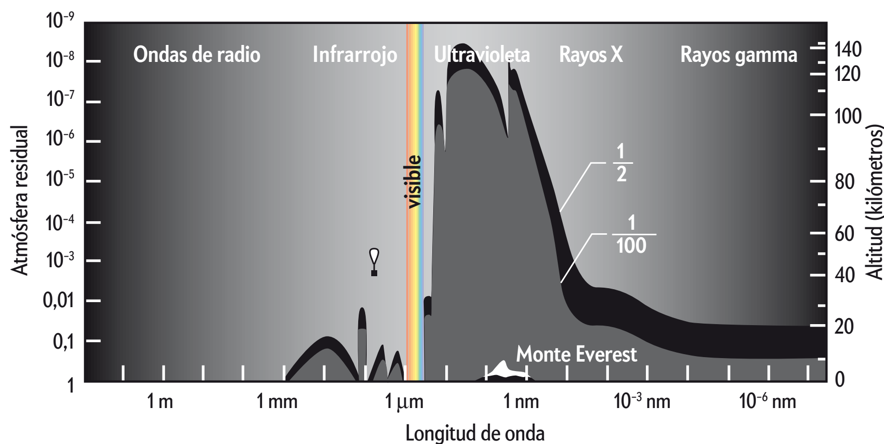
EN SÍNTESIS

Los telescopios a bordo de globos aerostáticos evitan las turbulencias atmosféricas y permiten el acceso a nuevas regiones del espectro electromagnético.

La astronomía en globo permitió el descubrimiento de los rayos cósmicos y proporcionó las primeras observaciones en el infrarrojo, el ultravioleta o los rayos X y gamma.

Los proyectos en globo resultan económicos, pueden desarrollarse con rapidez y abren el camino a las innovaciones técnicas de las misiones espaciales de mayor calado.



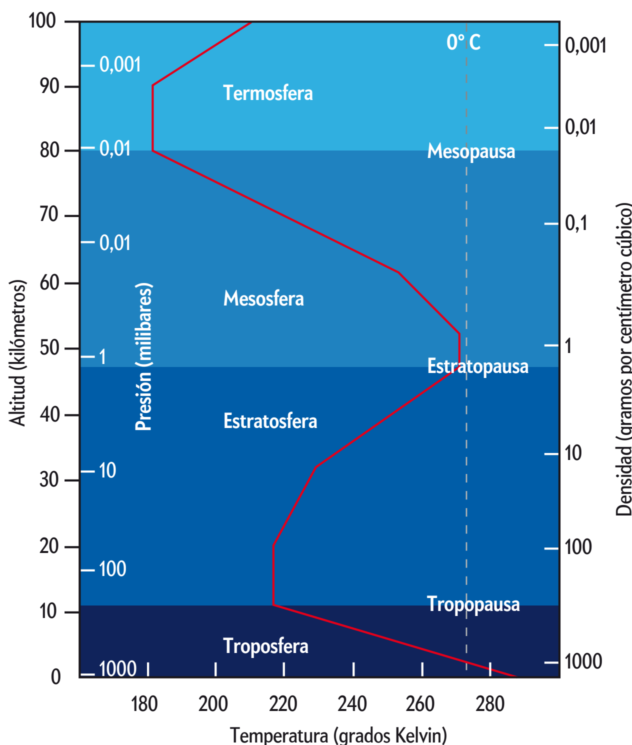


Absorción en la atmósfera: La radiación electromagnética procedente del espacio penetra a distinta profundidad en la atmósfera terrestre según sea su longitud de onda. Ambas curvas muestran la altitud a la que la radiación ha reducido su intensidad a la mitad (*negro*) y a una centésima parte (*gris*). La radiación infrarroja, los rayos X duros y los rayos gamma resultan observables desde un globo. Solo la radiación visible y las ondas de radio llegan hasta la superficie.

Los avances se sucedieron con rapidez. Bajo el patrocinio de Luis XVI, en septiembre de 1783, una oveja, un gallo y un pato realizaron una excursión aérea de diez minutos desde Versalles. Dos meses después, la primera *montgolfière* tripulada sobrevoló París durante 25 minutos, alimentada por un fuego de paja. Ya en diciembre del mismo año se elevaba el primer globo de hidrógeno con pasajeros a bordo, y en los años siguientes dio comienzo la investigación de las propiedades físicas de las zonas altas de la atmósfera, con globos lanzados desde París, Londres, Hamburgo y San Petersburgo. Gracias a ellos se estudió la presión, temperatura, composición del aire y el campo magnético terrestre a altitudes de hasta 7000 metros.

El 22 de marzo de 1874 se lanzó en Francia un globo aerostático cuyo único fin era la observación astronómica. A bordo se encontraban Théodore Sivel y Joseph Crocé-Spinelli, quienes, por encargo del observatorio astronómico de Meudon, cerca de París, observaron el Sol con un espectrómetro de mano. Su objetivo consistía en comprobar si algunas líneas oscuras del espectro tenían su origen en la atmósfera solar o en la terrestre. Si bien alcanzaron los 7300 metros de altitud, el resultado de sus pesquisas no fue unívoco. Un nuevo intento al año siguiente los llevó hasta los 8000 metros de altitud, pero el ascenso acabó en tragedia y los intrépidos exploradores fallecieron por falta de oxígeno.

Pero la astronomía en globo continuó. En 1887, el naturalista ruso Dmitri Ivánovich Mendeléiev, creador de la tabla periódica de los elementos, se elevó por encima de las nubes al norte de Moscú para observar un eclipse del Sol. Astrónomos franceses recurrieron al mismo método para contemplar la lluvia de estrellas fugaces de las Leónidas. Los ascensos de Victor Franz Hess en 1912 se vieron recompensados con un éxito notable. El físico deseaba descubrir la causa de la conductividad del aire. Si, como se pensaba entonces, su origen se hallase en la ionización del aire provocada por la radioactividad de los minerales terrestres, el efecto debía disminuir con la altitud. Eso fue justo lo que se registró en un primer momento, pero, tras alcanzar un mínimo a los 800 metros, la conductividad volvía a aumentar hasta los 5000 metros. Hess concluyó que había que asumir la existencia de «una radiación penetrante de origen extraterrestre». Un año después, Werner Kolhörster, provisto de instrumentos más sensibles, constató el mismo fenómeno a 9300 metros. Más tarde, confirmaría la naturaleza corpuscular de los rayos cósmicos, lo que le valió el premio Nobel de física de 1936.



La atmósfera terrestre: La curva roja muestra el curso de la temperatura en función de la altitud.

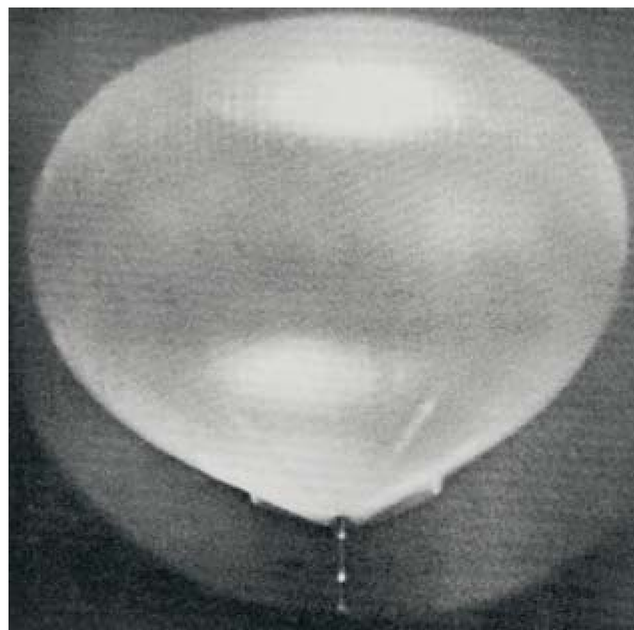
TIPOS DE GLOBOS

Los globos clásicos de aire caliente revisten poca importancia para la investigación moderna. Dada la escasa diferencia entre la densidad del aire frío del exterior y el aire caliente en el globo, deberían adoptar dimensiones gigantescas y, aun así, alcanzarían solo cotas modestas. En su lugar, y según la tarea que se desee llevar a cabo, hoy se emplean globos de tres tipos: hinchables de goma, de sobrepresión y de presión uniforme.

Los globos de las fiestas infantiles pertenecerían a la clase de los hinchables. Los servicios meteorológicos emplean globos de este tipo para enviar sus instrumentos hacia la estratosfera. El ascenso termina siempre con la explosión de la envoltura, ya que esta acaba por hincharse en exceso en una atmósfera cada vez más enrarecida. Los globos de sobrepresión se fabrican con un tipo de material que nos resulta familiar, el de las cintas de embalar. Su ascenso finaliza cuando se crea una ligera sobrepresión en el interior de su envoltura, no

SuW-GRAFIK (*arriba*), US STANDARD ATMOSPHERE/SuW-GRAFIK (*abajo*)

Hinchado: La envoltura de un globo de presión uniforme encierra varios cientos de miles de metros cúbicos, pero solo se hincha por completo a la altura deseada. En ese momento, la presión interior y la exterior se igualan. El gas sobrante puede escapar por una válvula situada en la parte inferior del globo.



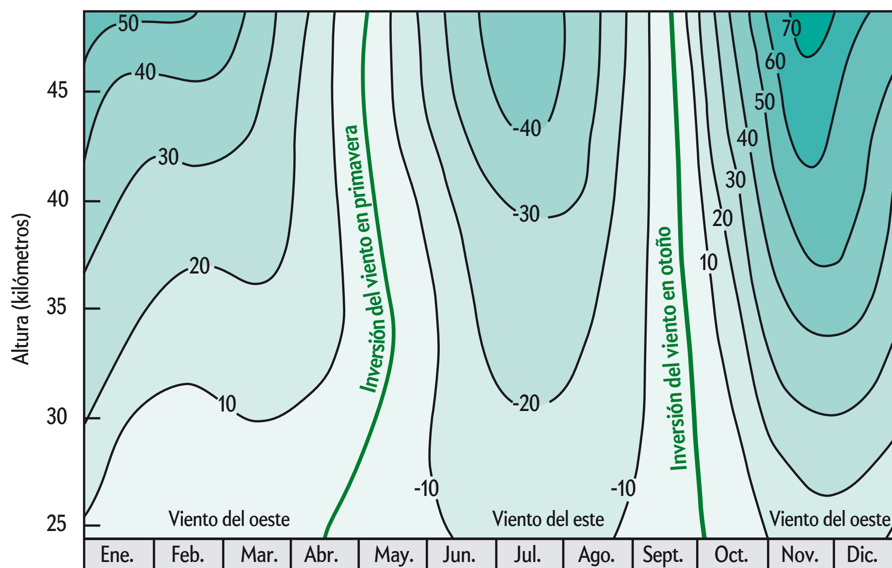
expansible. Su característica principal reside en que pueden flotar durante días a una altitud casi constante. Tales dispositivos se han empleado incluso en otros planetas: en 1985, dos globos fabricados con láminas de teflón —aportación francesa a las misiones soviéticas Vega 1 y 2— sobrevolaron la cara nocturna de Venus. Los aparatos, de 3,4 metros, flotaron a una altura de 50 kilómetros sobre la superficie, cada uno equipado con una sonda de 7 kilogramos suspendida de una cuerda de gran longitud. Durante dos días recorrieron más de 10.000 kilómetros y extrajeron información sobre la variable y hostil atmósfera del planeta vecino.

Para el transporte de instrumentos astronómicos a la alta atmósfera, sin embargo, se emplean solo globos de presión uniforme. Sus enormes envolturas constan de láminas de 25 micrómetros de espesor, fabricadas con polietileno o poliolefina (esta última resiste mejor las bajas temperaturas, por lo que resulta más fiable). Estos globos cuentan en su parte inferior con una válvula de escape siempre abierta. Antes del despegue, se llena en torno al 1 por ciento de su volumen con hidrógeno o helio. Durante el ascenso, el gas se expande hasta que, a una altitud de unos 33 kilómetros, llena toda la envoltura. A partir de entonces, el gas sobrante escapa a través de la válvula y, en cierto momento, el globo no asciende más, sino que flota en el aire con una presión interna aproximadamente igual a la del exterior. Esa característica posibilita una envoltura fina, un requisito importante para que el aparato pese lo menos posible.

ALTURA Y TIEMPO DE VUELO

Aparte del gas de relleno, el volumen del globo determina el peso de la carga útil y la altura a la que operará. Un globo de 500.000 metros cúbicos, por ejemplo, puede transportar 200 kilogramos hasta unos 42 kilómetros de altitud. Allí se ha dejado atrás más del 99,6 por ciento de la atmósfera, así como la mayor parte de la capa de ozono. Ello hace accesible la región del espectro en el ultravioleta intermedio, caracterizada por longitudes de onda de entre 200 y 300 nanómetros. A 33 kilómetros ya pueden efectuarse observaciones en el infrarrojo, puesto que a dicha altitud es ínfima la cantidad de vapor de agua, que absorbe en dicha longitud de onda. A tales cotas, un globo de 100.000 metros cúbicos basta para transportar un telescopio de 250 kilogramos. Una carga útil de la mitad de peso puede elevarse hasta los 48 kilómetros de altitud.

Durante el vuelo, los vientos de la estratosfera provocan la deriva del globo a lo largo de los paralelos terrestres. El lugar y momento del despegue requieren una planificación cuidadosa, ya que el aparato ha de mantenerse a la altura deseada durante el máximo tiempo posible y, además, debe volver a aterrizar sobre tierra firme. Los vientos estratosféricos cambian su curso dos veces al año. En el hemisferio norte dominan durante el verano los vientos del este y, en invierno, los del oeste. Cuando, en verano, el Sol calienta las masas de aire sobre



Vientos estratosféricos: La gráfica muestra las variaciones en los vientos estratosféricos sobre Texas, en el transcurso de un año. En invierno dominan los vientos del oeste; en verano, los del este. Durante las épocas de cambio de dirección, el viento disminuye su velocidad (aquí, en metros por segundo). Puede verse cómo esta aumenta con la altura.

WINZEN RESEARCH (*arriba*), NCAR/SuW-GRAFIK (*abajo*)

las áreas polares septentrionales, estas se expanden hacia el sur; al hacerlo, el efecto de la rotación terrestre las empuja hacia el oeste. En invierno tiene lugar el efecto opuesto.

La velocidad del viento a 40 kilómetros de altitud puede superar los 100 kilómetros por hora, por lo que, tras una noche de observación, el globo se habrá alejado más de 1000 kilómetros del lugar de despegue. Los mejores lugares de lanzamiento son, por tanto, aquellos emplazados en mitad de un gran continente, pues ello permite enviar globos durante todo el año. Los globos que despegan desde la base de Palestine, en Texas, pueden recorrer más de 1000 kilómetros hacia el este o el oeste antes de llegar al océano. En Francia, durante el verano los lanzamientos se efectúan desde la localidad de Gap, en los Alpes, mientras que en invierno se emplea la base de Air-sur-l'Adour, cercana a la costa atlántica.

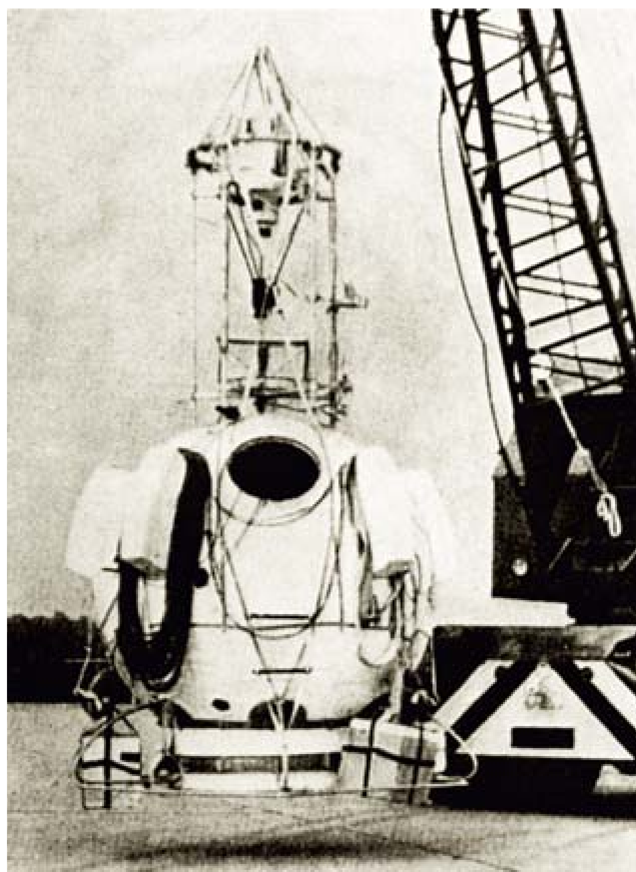
Un interés particular reviste la temporada de cambio en la dirección de los vientos, ya que entonces disminuye su velocidad. Durante los meses de mayo y septiembre son posibles tiempos de vuelo de unas 50 horas sin que el globo se aleje demasiado del lugar de lanzamiento. En las épocas del año en las que el viento alcanza velocidades mayores, ha de tenerse en cuenta que el globo, a pesar de encontrarse a una altura de más de 30 kilómetros, desaparece tras el horizonte después de recorrer unos 350 kilómetros, por lo que se pierde la comunicación por radio con el lugar de despegue debido a la curvatura de la Tierra. Si se depende de una conexión en tiempo real para recibir datos y emitir señales, resulta necesario disponer de otra estación terrestre a lo largo del trayecto de deriva. En caso contrario, los datos deben almacenarse a bordo o, como se ha empezado a hacer en fecha reciente, transmitirse vía satélite.

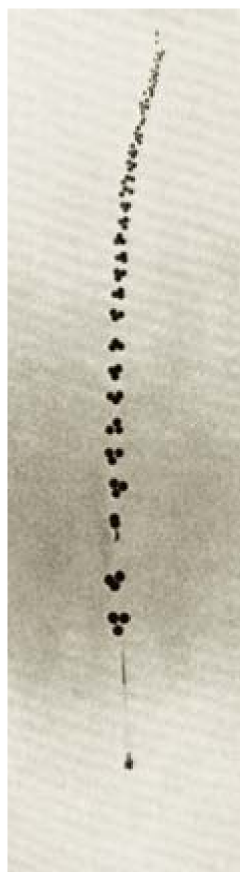
TELESCOPIOS EN GLOBO

Hoy día, los globos con telescopios a bordo no llevan tripulación. El último viaje tripulado lo protagonizó Audouin Dollfus en 1959. El astrónomo francés ascendió a una altitud de 13.500 metros en una cápsula presurizada en la que se había instalado un telescopio de 50 centímetros. Encontró más seguro emplear no solo uno, sino 104 globos hinchables. Al hacer estallar algunos de manera calculada y al aliviar lastre, Dollfus logró estabilizar la altitud y, más tarde, iniciar un descenso suave. Su objetivo consistió en determinar el contenido de vapor de agua en las atmósferas de Marte y Venus. Si bien la misión se saldó con éxito, la presencia de un tripulante perturbaba la estabilización del telescopio y, además, implicaba riesgos innecesarios. Ya los llamativos vuelos de los años sesenta, en especial los protagonizados por los Stratoscope de Martin Schwarzschild en EE.UU. para estudiar las atmósferas planetarias y la granulación del Sol, se lanzaron sin tripulación.

Con anterioridad a la llegada de los telescopios espaciales durante los años ochenta, los telescopios en globo se emplearon para el análisis de todas las regiones espectrales. A las grandes bases de lanzamiento, como el Centro Nacional de Investigación Atmosférica de Palestine, en Texas, afluían científicos de todo el mundo; durante las temporadas de cambio en la dirección de los vientos, se lanzaba un telescopio casi a diario. Los vuelos más prolongados se solían asignar a los telescopios de rayos gamma, pues el flujo de fotones resulta muy escaso y se requieren largos tiempos de observación.

La construcción, seguimiento y análisis de los resultados de un proyecto solían llevarse a cabo en un mismo instituto. Tras un vuelo exitoso, podían mejorarse los instrumentos y, a menudo, volverse a emplear durante la misma temporada de lanzamientos. Un proyecto así podía realizarse durante dos o tres años como parte de una tesis doctoral, un tiempo breve comparado con los 15 o 20 años habituales hoy día en la preparación y análisis de una misión con satélites. Los instrumentos espaciales generan unas cantidades de datos cientos de veces mayores, si bien su coste suele ascender a unas mil veces más que el de un proyecto en globo. Gran parte de esos gastos adicionales obedece a las medidas de seguridad, que garantizan el éxito de más de un 90 por ciento de las misiones espaciales. En comparación, los instrumentos en globo contaban con una tasa de éxito del 50 por ciento. Sin embargo, podían repararse, renovarse y volverse a utilizar con relativa facilidad.





El último viaje tripulado: Audouin Dollfus ascendió en 1959 a una altura de 13.500 metros para efectuar observaciones telescópicas desde una cápsula presurizada. La barquilla fue transportada por 104 globos hinchables unidos por una cuerda de 450 metros (*derecha*).

AUDOUIN DOLLFUS





Aterrizaje en la selva: La barquilla del globo THISBE fue desarrollada en el Instituto Max Planck de Astronomía de Friedrichshafen en colaboración con la empresa Dornier. Equipada con un telescopio infrarrojo refrigerado con hielo seco, fue lanzada varias veces durante los años setenta desde Palestine, Texas (*izquierda*). Las mediciones dieron lugar al primer mapa del área central de la Vía Láctea en una longitud de onda de 2,4 micrómetros. El viento decide dónde acaba el viaje. Después del aterrizaje, hubo que rescatar al THISBE en las selvas pantanosas de Louisiana (*derecha*).

WILFRIED HOFMANM (*izquierda*); DIETRICH LEMKE (*derecha*)

DEL DESPEGUE AL ATERRIZAJE

Para el despegue, la barquilla del globo cargada con el telescopio se cuelga de una grúa a algunos metros sobre el suelo. El resto del tiro se tiende sobre el suelo. Primero, la barquilla se conecta a un paracaídas, el cual queda unido por una cuerda de unos cien metros a la envoltura del globo. Esta, también de cien metros, permanece enrollada como una manguera. Después, se llena la parte superior de la envoltura con helio (en EE.UU.) o hidrógeno (en Europa). Para despegar, se libera de golpe la burbuja y esta se eleva sobre la barquilla. La grúa puede aún compensar los cambios en la dirección del viento a ras de suelo y, tan pronto como se ha tensado el tiro, se libera la barquilla. En tres o cuatro horas, el globo alcanza su altura de operación a 30 o 40 kilómetros. En Francia, en lugar de una grúa, se emplea para el despegue un globo auxiliar. Ello hace posible el lanzamiento con vientos de superficie más intensos.

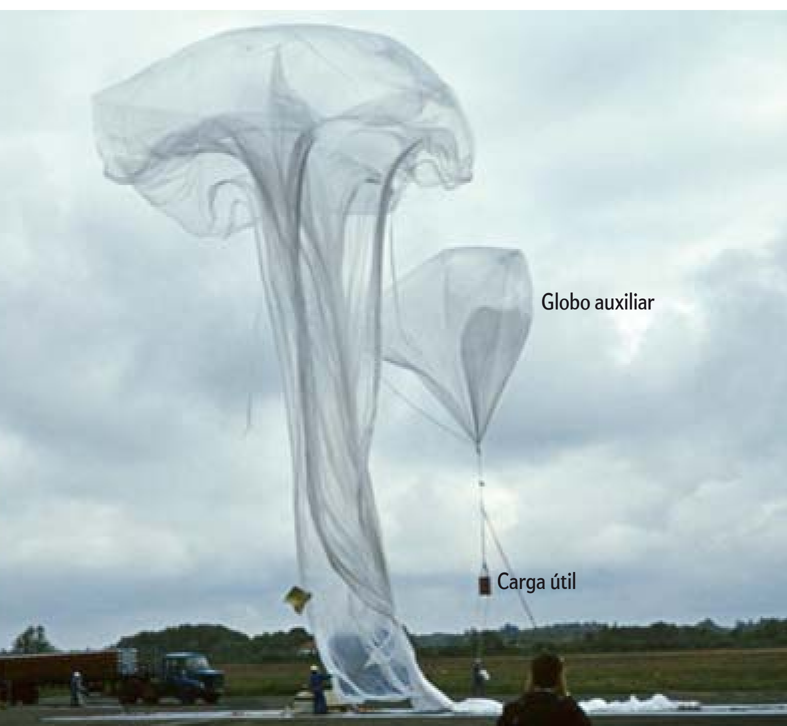
Finalizada la observación, una señal de radio desprende al globo del resto del tiro. Este se precipita en caída libre hasta una altitud de unos diez kilómetros, zona en la que la densidad del aire ya ha aumentado lo suficiente como para permitir el uso del paracaídas. La barquilla aterriza sobre suelo con una velocidad de unos 5 metros por segundo; los amortiguadores y flotadores limitan la aceleración del choque contra el suelo a no más de cinco veces la aceleración de la gravedad terrestre. Las dificultades pueden aparecer cuando el aterrizaje acontece en mitad de la selva, como las que abundan en algunos estados meridionales de EE.UU. También se producen pérdidas cuando falla el paracaídas o, como ha llegado a ocurrir, cuando los vecinos acribillan a balazos la barquilla a fin de evitar que desciendan de ella invasores extraterrestres.

DESCUBRIMIENTOS MÚLTIPLES

Los telescopios en globo han sido fuente de toda una variedad de descubrimientos astronómicos, sobre todo durante los años setenta y ochenta. Gracias a ellos se descubrió que los rayos cósmicos se componían de núcleos de casi todos los elementos del sistema periódico, además de electrones y positrones. A pesar de que su origen se sitúa mucho más allá de los confines del sistema solar, la abundancia relativa de los núcleos se asemeja en gran medida a la hallada en este. Algunas discrepancias en el caso de núcleos ligeros, como litio, berilio y boro, pudieron explicarse como consecuencia de la desintegración de núcleos pesados a su paso por el medio interestelar, lo que posibilitó determinar su densidad. Algunos núcleos son isótopos radiactivos, por lo que sirven de «reloj»: la ausencia casi completa de berilio-10 indica que la radiación cósmica cuenta con más de 10 millones de años de antigüedad.

Los telescopios de rayos gamma observaron la radiación generada por la aniquilación de electrones y positrones en el centro de la galaxia, con su línea característica de 0,51 megaelectronvoltios (MeV). También pusieron de manifiesto la gran variedad de fuentes extragalácticas que emiten en estas longitudes de onda. Asimismo, se halló un excedente en la radiación gamma difusa de la galaxia en la región entre 1 y 10 MeV, por entonces inexplicable.

En 1974, durante las ocultaciones de la nebulosa del Cangrejo detrás de la Luna, los telescopios de rayos X determinaron las emisiones de la nebulosa en dicha longitud de onda, lo que mejoró los modelos de transmisión de energía desde su púlsar central. Otro ejemplo de estudio lo constituye la fuente Hércules X-1, que emite pulsos de rayos X con un período de 1,24 segundos. La radiación procede de un sistema binario



Globos para el despegue: Un globo auxiliar eleva la carga útil durante un despegue en Francia. Se separará tan pronto como el globo principal ascienda y se haya tensado el tiro.

formado por una gigante azul variable y una estrella de neutrones. Desde la envoltura de la gigante fluye materia hacia su compañera compacta: guiada por el intenso campo magnético, la materia se precipita hacia las zonas polares de la estrella de neutrones, donde crea un foco candente a unos 200 millones de grados, el cual constituye la fuente de rayos X. Con el telescopio de globo de la Universidad de Tubinga y el Instituto Max Planck de Física Extraterrestre en Garching, se descubrió en 1976 una línea de ciclotrón. Esta se produce debido a que, en campos magnéticos intensos, los electrones solo pueden ocupar niveles de energía discretos, lo que produce un espectro con líneas de emisión y absorción características. De dicho espectro se pudo deducir que la intensidad del campo magnético de la estrella de neutrones ascendía a 100 millones de teslas. Los telescopios de rayos X a bordo de globos han descubierto los cuásares más luminosos, así como nuevas regiones de altas temperaturas (a unos 35 millones de grados) en las erupciones solares.

En el infrarrojo cercano, los telescopios en globo cartografiaron por vez primera la distribución a gran escala de las es-

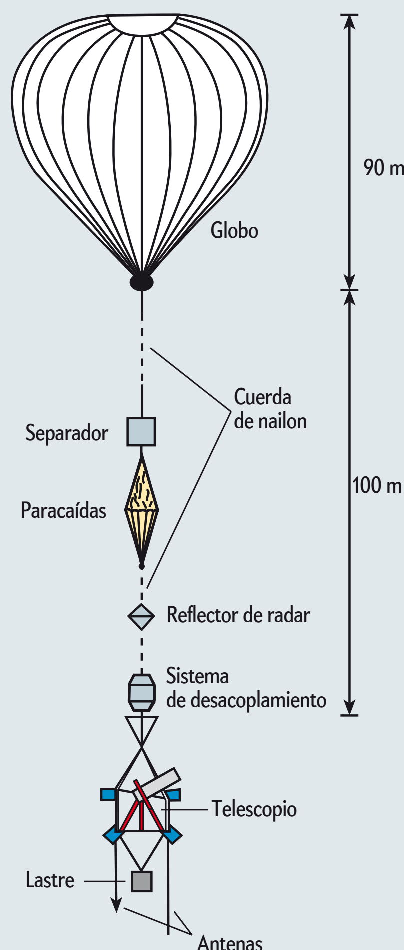
ASÍ FUNCIONA

Estabilizar un telescopio de globo

¿Cómo se consiguen observaciones astronómicas con un telescopio unido a un globo que es arrastrado por el viento? Para algunas aplicaciones (telescopios de rayos gamma de baja resolución y observación de fuentes extensas en el infrarrojo) basta con ajustar el telescopio con precisión de minutos de arco. El viento induce en la barquilla, unida al globo por una cuerda larga, una oscilación lenta, cuya amplitud asciende a unos nueve minutos de arco. Ello implica que, en dos de los tres ejes, el telescopio ya se encuentra estabilizado con dicha precisión. El período de la oscilación depende solo de la longitud de la cuerda; con una longitud de 100 metros, toma el valor de unos 18 segundos. Perturbaciones tan lentas se corrigen con facilidad.

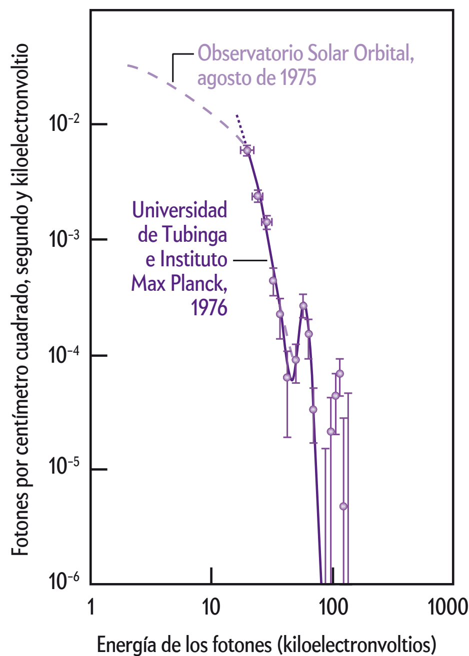
La rotación en el tercer eje, el vertical, se puede controlar con un magnetómetro que, al igual que una brújula, determina la dirección del azimut. Para ajustarla, un motor situado entre la cuerda y la barquilla hace girar unas pesas en la dirección opuesta al giro natural de la barquilla. Ello estabiliza el telescopio con una precisión de 30 minutos de arco.

Un ajuste más fino requiere un sistema de giroscopios. En el telescopio THISBE se logró de esta manera una precisión de unos tres minutos de arco en todos los ejes. Esta estabilización, lograda con medios muy económicos, puede mejorarse hasta un segundo de arco gracias a sensores que guían pequeños espejos basculantes a lo largo del camino óptico.

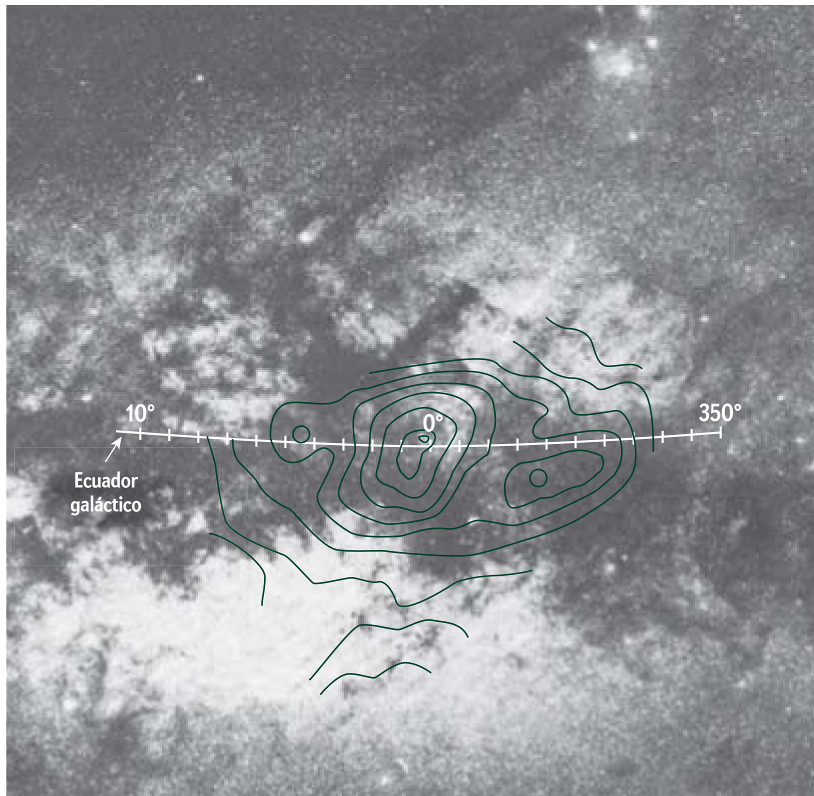


Un tiro típico consistente en barquilla y globo cuenta con una longitud aproximada de 200 metros.

DIETRICH LEMKE (*fotografía y gráfico*)



Estrellas de neutrones: El telescopio de globo de rayos X de la Universidad de Tubinga y del Instituto Max Planck de Física Extraterrestre en Garching descubrió en 1976 la radiación de ciclotrón producida en el intenso campo magnético de la estrella de neutrones del sistema binario Hércules X-1. Esta se manifiesta en la estructura de emisión y absorción observada en el espectro.



Astros ocultos: Uno de los vuelos del telescopio THISBE generó los datos de este mapa del área central de la Vía Láctea en una longitud de onda de 2,4 micrómetros (representados por curvas de nivel sobre una imagen óptica). La radiación infrarroja proviene de miles de millones de estrellas frías, cuya luz visible queda absorbida por las nubes de polvo interestelar.

JOACHIM TRÜMPER/MPE/SuW-GRAFIK (*izquierda*); WILFRIED HOFMANN ET AL., *ASTRONOMY & ASTROPHYSICS*

trellas frías en el centro galáctico y el plano de la galaxia. Tales astros resultan indetectables en el visible, debido a que esa luz es absorbida por las nubes de polvo. A su vez, la distribución de polvo en la Vía Láctea se determinó a partir de las observaciones en el infrarrojo lejano. Parte de tales estudios fue el descubrimiento de emisiones en dicha longitud de onda provenientes de las regiones H-II, nebulosas de polvo e hidrógeno ionizado alimentadas por estrellas calientes de reciente formación. A longitudes de onda mayores, los telescopios de globo determinaron el espectro de la radiación cósmica de fondo y su distribución uniforme a lo largo de toda la esfera celeste. También desde globos se detectó una primera anisotropía en dicha radiación, provocada por el movimiento de la Tierra con respecto al fondo.

DEL GLOBO AL SATÉLITE

Las observaciones en globo no solo proporcionaron una ingente cantidad de datos científicos, sino que también sirvieron de marcapasos para el desarrollo de los instrumentos astronómicos de las misiones en satélite. Los complejos telescopios característicos de la astronomía de altas energías, consistentes en contadores de centelleo, contadores Geiger y cámaras de chispas, nunca pudieron probarse sobre la superficie terrestre, ya que los rayos X y gamma no atraviesan la atmósfera. Las mejoras progresivas de tales instrumentos se lograron gracias a campañas de lanzamiento de globos, las cuales se prolongaron durante varios años y sirvieron de base al exitoso instrumental de los satélites de los años ochenta.

Los experimentos con globos del Instituto Max Planck de Física Extraterrestre en Garching condujeron al espectrómetro de rayos X Hexe de la estación espacial Mir y, más adelante, al satélite de rayos X Rosat. Las observaciones en globo en la región gamma del espectro abrieron el camino al Observatorio Compton, que, de 17 toneladas de peso, fue lanzado al espacio en 1991. Hubo desarrollos similares en todas las áreas del espectro. Por ejemplo, astrónomos de Reino Unido, Países Bajos, Francia y Alemania, que gozaron de una larga experiencia común gracias a las campañas de globos de los años setenta, pasaron después a formar parte de los grupos de instrumentación que pusieron a punto el Observatorio Espacial Infrarrojo (ISO). Los experimentos en globo aportaron a los científicos e ingenieros que en ellos participaron una valiosa experiencia en la gestión de experimentos espaciales, campañas de lanzamiento, procesamiento de datos y planificación de observaciones para otros telescopios «inaccesibles».

LOS GLOBOS MÁS RECIENTES

Aunque menos populares que hace 35 años, aún hoy se construyen telescopios de globo de un tamaño considerable. Gracias al telescopio francés de 2 metros PRONAOS, en 1998 se observó el efecto Sunyaev-Zel'dovich en el infrarrojo lejano en el cúmulo de galaxias Abell 2163. El efecto consiste en un incremento de energía que experimentan los fotones de la radiación cósmica de fondo al atravesar el plasma caliente de un cúmulo de galaxias. Los electrones del plasma transfieren energía a los fotones de la radiación de fondo; ello debilita las regiones de

longitud de onda larga de su espectro, y el cúmulo de galaxias aparece como una «sombra» sobre el fondo de radiación.

El Telescopio de Globo Submilimétrico de Gran Apertura (BLAST), producto de un consorcio estadounidense, canadiense y británico, posee también un espejo principal de 2 metros. Durante misiones en Suecia y la Antártida en 2006, se cartografiaron regiones de formación estelar y se determinó la distribución de materia de los nódulos fríos (con temperaturas por debajo de 14 kelvin), los cuales contienen un dos por ciento del gas molecular frío. Se cree que estos nódulos son los que dan origen a nuevas estrellas. Como parte de un programa de investigación extragaláctica, BLAST midió la radiación difusa en el infrarrojo lejano. Esta radiación comprende todas las galaxias lejanas y, por ello, abre la puerta a la historia de la creación de estructuras en el pasado cósmico. Algunos expertos que participaron en el proyecto contribuyeron al instrumental del observatorio espacial infrarrojo Herschel, lo que ahora les ha permitido continuar sus investigaciones desde el espacio con una resolución y sensibilidad mayores.

Los resultados obtenidos por el telescopio BOOMERanG generaron un interés especial. Sobrevoló la Antártida en 1998 y 2003. Merced a la estabilidad de los vientos estratosféricos en el vórtice polar, orbitó en torno al Polo Sur durante diez días a una altitud de más de 35 kilómetros; después regresó, como un bumerán, cerca del punto de despegue. Durante el primer vuelo se descubrieron las pequeñas anisotropías de la radiación cósmica de fondo, las cuales dan fe de las fluctuaciones a partir de las cuales se formaron las grandes estructuras del universo, como los cúmulos de galaxias. La resolución del telescopio, de 1,2 metros, fue 30 veces superior a la del satélite COBE, de la NASA, en 1991.

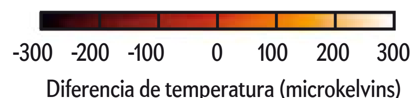
A partir de los datos de BOOMERanG se pudieron determinar por primera vez los parámetros cosmológicos con exactitud. De estos se dedujo la existencia de la energía oscura y, con ellos, se comprobó la geometría euclídea del universo. Estos resultados fueron confirmados, refinados y complementados más tarde por el satélite WMAP de la NASA. Varios de los científicos que participaron en las observaciones de BOOMERanG continúan hoy día sus investigaciones con el satélite Planck. Este cuenta con una resolución y sensibilidad mayores y, además, mide también la polarización de la radiación de fondo, en la cual se esperan encontrar indicios de las ondas gravitacionales procedentes de la gran explosión.

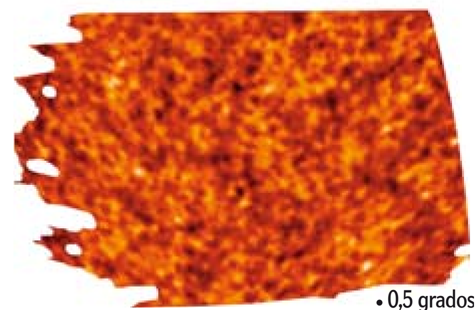
Los telescopios de globo también han jugado un papel relevante en la física solar, ya que desde la estratosfera pueden conseguirse imágenes muy nítidas de la superficie del astro. El telescopio de globo Sunrise es el telescopio solar de mayor tamaño que jamás haya dejado la superficie terrestre. Su espejo de un metro puede resolver estructuras espaciales de unos 35 kilómetros sobre la superficie del Sol. El objetivo de sus observaciones consiste en medir los campos magnéticos que gobiernan la actividad solar. Despegó en junio de 2009 desde Kiruna, al norte de Suecia, y sobrevoló el Atlántico Norte, Groenlandia y llegó hasta Canadá, donde fue recuperado sin problemas. Desde 37 kilómetros de altura, observó la evolución de la granulación del Sol durante cinco días y medio sin interrupción, ya que el viento lo llevó a lo largo de una ruta iluminada por el sol de medianoche. La gran altitud del vuelo le permitió observar también en el ultravioleta intermedio, a una longitud de onda de 215 nanómetros. Además de su tamaño, desde un punto de vista técnico no deja de impresionar el peso de Sunrise: la barquilla y el telescopio pesan 2600 kilogramos, el globo, 2000 kilogramos, y el paracaídas, 600; en total, casi seis toneladas se elevaron hasta la estratosfera. Otra misión de Sunrise consistiría en circunvalar el Polo Norte si se pudiese obtener la autorización de Rusia. El Instituto Max Planck para la Investigación del Sistema Solar en Katlenburg-Lindau dirige el proyecto, apoyado por el Instituto Kiepenheuer de Física Solar e investigadores líderes en el campo de España y Estados Unidos. Uno de los objetivos técnicos del Sunrise lo constituye la preparación de experimentos similares para el satélite europeo Solar Orbiter, cuyo despegue se prevé para 2017.

HACIA LOS CONFINES DEL UNIVERSO

Después de que se hayan aplazado durante años los grandes interferómetros espaciales de la ESA (Darwin) y de la NASA (Terrestrial Planet Finder) debido a dificultades de índole técnica y económica, astrofísicos de Francia y EE.UU. planifican



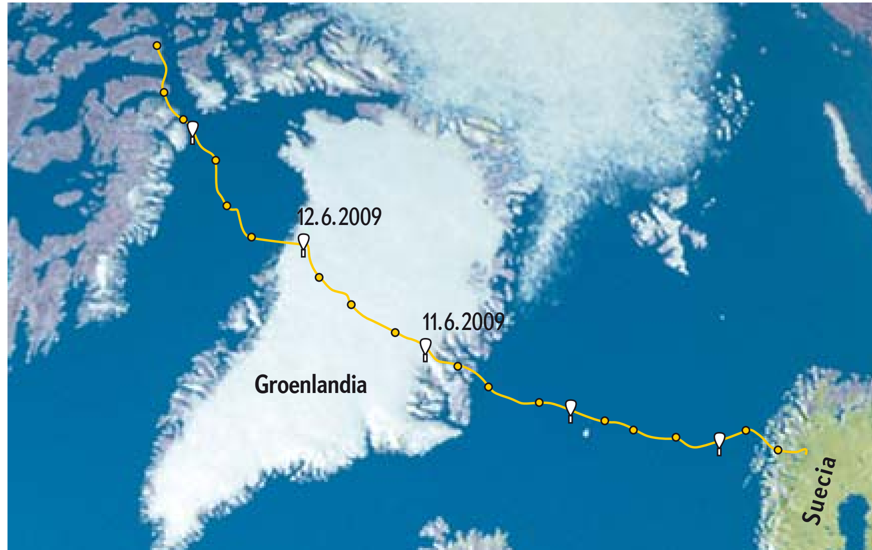


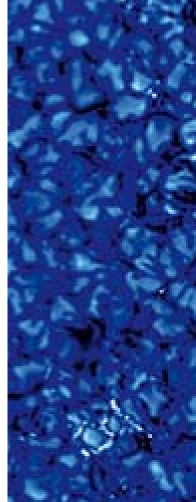


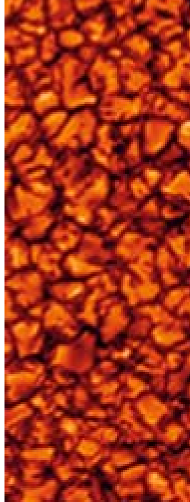
Radiación cósmica de fondo: En 1998, el telescopio BOOMERanG despegó de la Antártida para realizar un viaje de 19 días alrededor del Polo Sur. Durante el vuelo se descubrieron las anisotropías en el fondo cósmico de microondas (*arriba*).

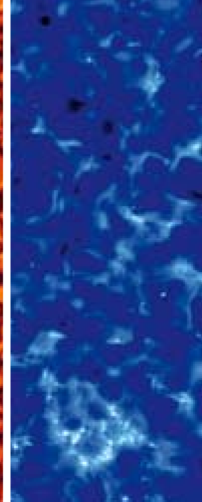
BOOMERANG

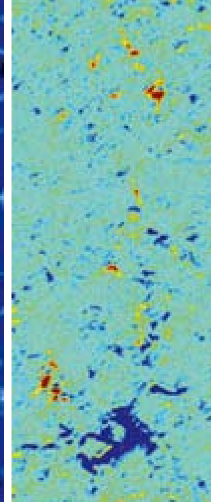












El telescopio Sunrise (*arriba*), el mayor telescopio solar que haya abandonado la superficie terrestre, realizó en 2009 un viaje de casi seis días desde Kiruna, en Suecia, hasta Canadá. Gracias a que el Sol jamás se ocultó a lo largo de su ruta polar, Sunrise observó el astro sin interrupción durante todo ese tiempo. Se obtuvieron imágenes de la granulación del Sol en el ultravioleta y el visible, e imágenes de la cromosfera a la longitud de onda de la línea H del calcio a 397 nanómetros. Las mediciones de la polarización circular en el visible ponen de manifiesto pequeñas zonas con un intenso campo magnético.

INSTITUTO MAX PLANCK PARA LA INVESTIGACIÓN DEL SISTEMA SOLAR (*fotografía*); TERRAFORMA/SUW-GRAFIK (*mapa*); IMPISS/IMAX-KONSORTIUM (*imágenes espectrales*)

ahora experimentos preliminares con telescopios de globo. En uno de ellos, la luz proveniente de dos telescopios debe interferir sobre los extremos de una fibra de carbono de 10 metros de longitud. De esta manera se podría comprobar, bajo condiciones similares a las existentes en el espacio pero a una altitud de 40 kilómetros, la viabilidad de un instrumento extremadamente complicado. Este interferómetro de globo podría también efectuar sus propios descubrimientos: nubes de luz zodiacal en torno a otras estrellas similares al Sol, la composición química de los discos protoestelares. El éxito de estos experimentos impulsaría la reanudación de los proyectos con interferómetros espaciales.

Durante las dos últimas décadas, los experimentos con globos han perseguido dos objetivos: por un lado, mediciones imposibles de realizar desde la superficie terrestre, pero que aún no podían efectuarse desde el espacio; por otro, sirvieron al desarrollo paulatino de los instrumentos que, más adelante, habrían de transportar los satélites, mucho más costosos. En el proceso, los participantes adquirieron gran cantidad de conocimientos que favorecerían la ejecución científica y técnica de los proyectos espaciales.

Los experimentos en globo pueden llevarse a cabo con relativa rapidez, resultan económicos y son susceptibles de mejoras posteriores después de recuperar los instrumentos, lo que en general se logra sin problemas. Un programa germano-sueco para estudiantes ofrece la posibilidad de realizar experimentos menores de un año de duración. Sin embargo, ninguna organización fomenta la experimentación en globo del mismo modo en que la NASA y la Agencia Espacial Europea hacen con los experimentos espaciales, o el Observatorio Europeo Austral con la astronomía terrestre. En cualquier caso, el ascensor más antiguo y más sencillo a los confines del universo jugará su baza en la astronomía del futuro.

PARA SABER MÁS

La invención del globo aerostático y el nacimiento de la química. Arthur F. Scott en *Investigación y Ciencia*, abril de 1984.

Flotando en el espacio. Steve Smith Jr. y James A. Cutts en *Investigación y Ciencia*, febrero de 2000.

Página web del proyecto BOOMERanG: **http://cmb.phys.cwru.edu/boomerang**

Proyectos de investigación con cohetes y globos para estudiantes: **http://www.rexusbexus.net**



Michel M. Maharbiz es profesor de ingeniería eléctrica e informática en la Universidad de California. Su laboratorio ha destacado por implantar en insectos sistemas de control computerizados.



Hirotaka Sato es doctor en química por la Universidad Waseda de Tokio, donde ha investigado los procesos de nanofabricación en electroquímica. Posteriormente ha trabajado sobre escarabajos *cyborg* en Berkeley y en la Universidad de Michigan en Ann Harbor.



ROBÓTICA

Escarabajos *cyborg*

Diminutos robots voladores, parte insecto y parte máquina, ayudarán algún día a salvar vidas en caso de guerra o catástrofe

Michel M. Maharbiz y Hirotaka Sato

La mosca común constituye un verdadero logro de ingeniería aeronáutica. Su habilidad para esquivar el matamoscas se debe a la notable velocidad con que bate sus alas, nada menos que unas 200 veces por segundo. Semejante rapidez obedece a una biomecánica compleja: sus alas no se mueven por acción directa de los músculos del tórax; antes bien, cuando el insecto tensa y relaja de manera rítmica los músculos, el tórax se deforma y hace vibrar las alas de modo parecido a como lo harían los brazos de un diapasón. De esta manera, con un esfuerzo mínimo, la mosca convierte una minúscula cantidad de energía en un vuelo diestro y muy veloz.

En esta época de miniaturización de los circuitos electrónicos y avances en las técnicas de microfabricación, los ingenieros han intentado construir máquinas voladoras diminutas que emulen esas habilidades. En 2008, la Universidad de Tecnología de Delft presentó su DelFly Micro: pesaba tres gramos, su envergadura era de 100 milímetros e iba equipada con una videocámara en miniatura. Un prototipo del Laboratorio de Microrrobótica de Harvard pesaba solo 0,06 gramos (aun así, cuatro veces más que una mosca), pero una vez en vuelo ya no podía controlarse. En todo caso, el problema principal de estos insectos mecánicos reside en la gran cantidad de energía que consumen. Nadie ha conseguido bate-

EN SÍNTESIS

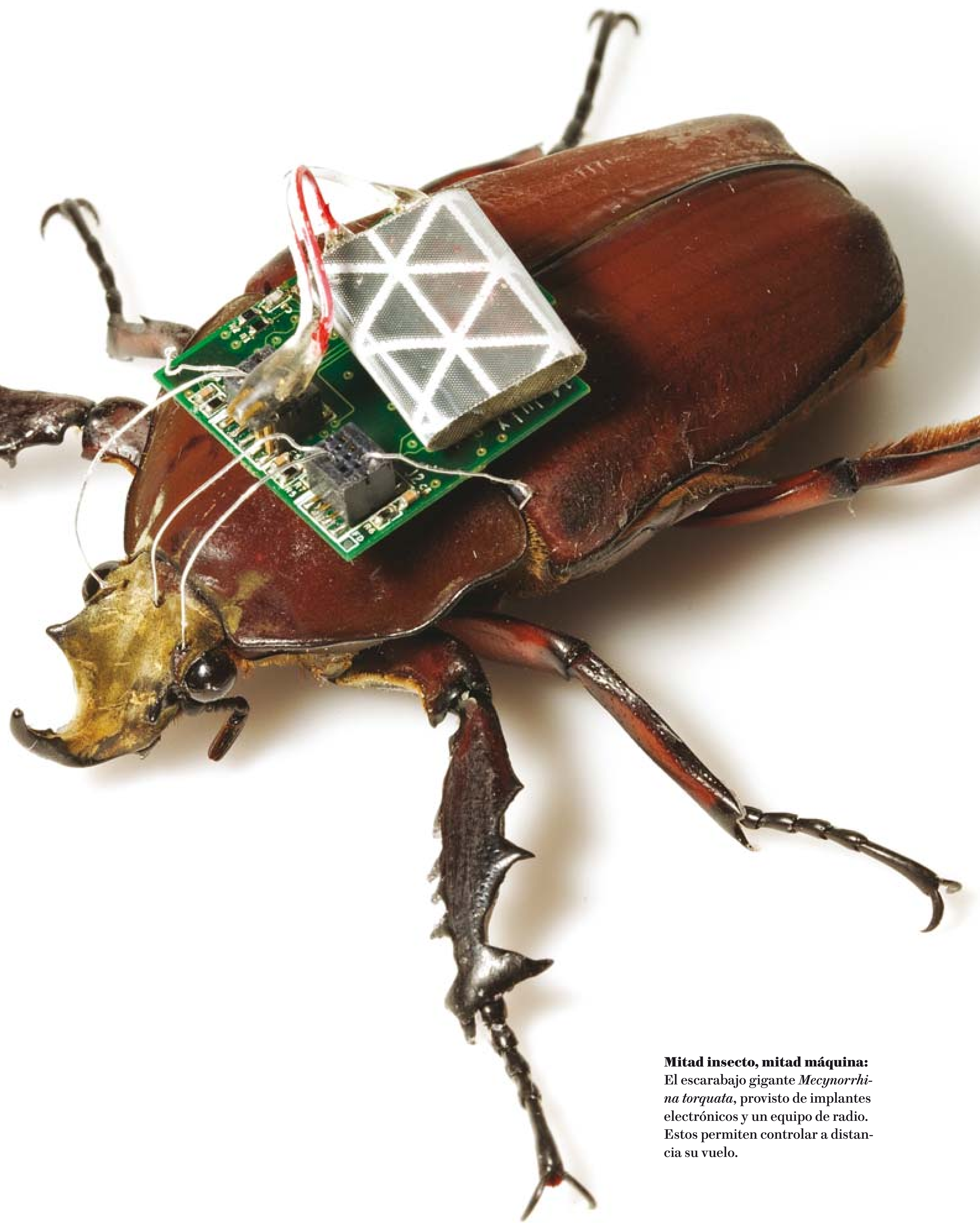
El Ejército desea desarrollar robots voladores en miniatura. Serían de utilidad en conflictos bélicos o en la búsqueda de supervivientes tras una catástrofe.

A día de hoy, los insectos artificiales consumen gran cantidad de energía. Las baterías en miniatura existentes no garantizan más de unos minutos de autonomía de vuelo.

Una solución pasa por emplear insectos reales provistos de implantes electrónicos en el sistema nervioso que permitan dirigir su vuelo por control remoto.

Varios grupos de investigación de Berkeley, Cornell y el Instituto de Tecnología de Massachusetts ya han conseguido los primeros escarabajos *cyborg*.

DAVID LIITTSCHWAGER



Mitad insecto, mitad máquina: El escarabajo gigante *Mecynorrhina torquata*, provisto de implantes electrónicos y un equipo de radio. Estos permiten controlar a distancia su vuelo.

rías en miniatura que garanticen más de unos pocos minutos de vuelo.

Nuestro trabajo de los últimos años se ha centrado en evitar tales limitaciones técnicas: en vez de construir un insecto robótico, nos hemos decidido por emplear insectos reales a modo de máquinas voladoras. Ello evita la necesidad de baterías y todo el proceso de microfabricación. En su lugar, hemos diseñado dispositivos para el control del animal: el insecto vuela por sí mismo, pero una serie de circuitos implantados en su sistema nervioso le transmiten órdenes (volar hacia arriba o hacia abajo, girar a la derecha o a la izquierda) procedentes de operadores humanos. En otras palabras, hemos construido *cyborgs* voladores, mitad insecto y mitad máquina.

Deseábamos demostrar que es posible inducir el vuelo de un insecto por control remoto, dirigir su trayectoria y hacer que se detenga en una posición prefijada

La idea se nos ocurrió hace unos seis años, cuando uno de nosotros (Maharbiz, experto en técnicas de microfabricación, pero por entonces lego en materia de insectos) asistía a una conferencia sobre el tema organizada por la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa (DARPA). Los asistentes presentaron técnicas que permitían recibir y grabar las señales eléctricas originadas en los músculos de insectos en vuelo. Amit Lal, director del programa y organizador de la conferencia, creía llegado el momento de investigar la implantación de microcircuitos que indujesen movimientos musculares en el insecto mediante la transmisión de señales eléctricas.

Los insectos *cyborg* hallarían numerosas aplicaciones militares, como averiguar cuántas personas se encuentran en el interior de un edificio e identificarlas antes de ordenar un desalojo. Pero estos híbridos de silicio y carbono también servirían a fines civiles, como la búsqueda de supervivientes tras una catástrofe.

¿POR QUÉ ESCARABAJOS?

Con anterioridad a la conferencia de la DARPA, los estudios se habían centrado en el vuelo de langostas, polillas y moscas. Dada nuestra experiencia previa en la materia, pensamos que sería posible evitar los traspiés de los que sufre toda disciplina incipiente. En vista de que, a pesar de su gran tamaño, las polillas y las langostas no pueden cargar con mucho peso, nuestros primeros intentos se dirigieron hacia las moscas.

Las moscas cuentan con varias ventajas. Por un lado, sus características biológicas se conocen con gran detalle. Michael H. Dickinson, del Instituto de Tecnología de California, y otros han estudiado las contracciones musculares que permiten al insecto sustentarse y girar. Además, las moscas aprovechan la energía con una eficiencia formidable, lo que les permite batir y orientar las alas a gran velocidad. Sin embargo, no se prestan con facilidad a labores de ingeniería: su diminuto tamaño exigiría un nanocirujano para implantar en ellas todos los circuitos necesarios. Así pues, decidimos buscar alternativas. Las libélulas, de mayor tamaño y con habilidades de vuelo excepcionales, adolecían de una excesiva fragilidad. Las cucarachas constituían otra opción.

Fue por entonces cuando cayó en nuestras manos un ejemplar de *The Biology of the Coleoptera* («Biología de los coleópteros»), un manual clásico escrito por R. A. Crowson en 1981. Allí descubrimos que los escarabajos, al igual que las moscas, poseen en el tórax una serie de músculos que deforman el tegumento dorsal y que inducen así la vibración de las alas. La clase de músculos que intervienen y las posiciones que adoptan también resultan similares a las de la mosca. Algunos estudios sobre coleópteros realizados durante los años cincuenta nos indicaron por dónde empezar. Quizá lo más importante fuese su tamaño —desde un milímetro hasta más de 10 centímetros— y el gran número de especies que abarcan —un quinto de todas las conocidas—. Si bien el camino se antojaba fácil, después descubriríamos que en EE.UU. apenas se criaban escarabajos del tamaño que necesitábamos. Tardamos años en conseguir un suministro estable, que ahora importamos de criaderos de Europa y Asia.

Fue en ese momento cuando otro de nosotros (Sato, químico especializado en técnicas de nanofabricación) se incorporó al proyecto en calidad de investigador postdoctoral. Nos propusimos demostrar que era posible controlar a distancia el vuelo de un insecto: ordenarle que echara a volar, gobernar sus giros y su velocidad, y detenerlo después en una posición prefijada. Como ingenieros, deseábamos que tales funciones resultasen reproducibles, fiables y que infligiesen un daño mínimo o nulo al animal.

Lo primero fue decidir el mínimo de comportamientos básicos cuyo control nos garantizaría un *cyborg* rudimentario. A diferencia de lo que otros grupos habían hecho, nosotros no deseábamos emplear hilos, ya que habrían de ser largos y podrían enredarse. En consecuencia, nos decidimos por el control remoto para poner en marcha y frenar el batido de las alas, modificar la altura de vuelo e inducir giros a derecha e izquierda. Renunciamos a controlar cada detalle, pues los escarabajos ya exhiben gran habilidad a la hora de nivelar el vuelo o ajustar su trayectoria y velocidad en función del viento y los obstáculos. Por último, debíamos garantizar que las señales llegasen hasta el sistema neuromuscular del insecto para que, en caso de que intentara comportarse de otro modo, pudiéramos enviarle una contraorden.

La mayoría de los coleópteros que elegimos soportaban cargas de entre el 20 y el 30 por ciento de su peso, lo que determinaba el peso máximo del equipo de control. Dado que sabíamos qué músculos controlaban los aleteos del escarabajo, supusimos que, si inducíamos impulsos eléctricos de frecuencia variable a uno y otro lado del cuerpo, alteraríamos el batir de sus alas y modificaríamos la trayectoria de vuelo.

Los escarabajos se ayudan de una gran cantidad de estímulos visuales mientras vuelan. Al igual que en los humanos, la luz que llega a sus ojos activa neuronas fotosensibles; estas envían señales al cerebro y los ganglios, donde se transforman en información visual. En el caso de los coleópteros, la cantidad de luz que llega a sus ojos reviste un papel crucial: si se apaga por completo la luz de la sala en la que vuela un escarabajo, este se detiene de inmediato. Ello implica que el animal necesita algún tipo de información óptica para continuar batiendo las alas. Dedujimos, por tanto, que la estimulación del lóbulo óptico o del área cercana a su base quizás indujese respuestas motrices. Para evitar que una implantación directa en el ojo o en el lóbulo óptico afectase a la capacidad de maniobra del insecto, concentramos la estimulación en las zonas próximas a la base de los lóbulos. No fue necesario estimular las neuronas una a una. Al

Insecto y máquina

Los autores emplearon impulsos eléctricos de duración determinada para estimular zonas extensas del sistema neuromuscular del insecto y dirigir así su vuelo. Si la estimulación dependiera de la activación de una sola neurona, los resultados no podrían repetirse en un gran número de insectos, ya que, al menor desplazamiento del implante, se perdería el control del escarabajo.

Mecanismo de vuelo de un escarabajo

Los coleópteros no baten directamente las alas. Dos grupos de músculos se alternan para deformar el tórax (*en naranja, los de contracción; en azul, los de estiramiento*), lo que induce una vibración de las alas similar a la de los brazos de un diapasón. Ello imprime al movimiento una gran rapidez.

Músculo dorsal-longitudinal

Músculo dorsal-ventral

Control remoto

De modo muy parecido a los coches o aviones de juguete, durante el vuelo un sistema de control envía a los insectos órdenes por radio.

Se implantan en el insecto seis electrodos: cerca de los lóbulos ópticos izquierdo y derecho, en el cerebro, en el tórax (contraelectrodo) y en los músculos basalares de vuelo derecho e izquierdo.

Una placa base con un circuito impreso distribuye los impulsos eléctricos hacia el lugar adecuado para que el insecto remonte vuelo, maniobre o se detenga. Sobre la placa puede verse la batería, de color plateado.

1,6 cm

Una antena recibe las órdenes de vuelo y las transmite a la placa base.

Mecynorrhina torquata

Tamaño real

Primeras experiencias

Las primeras pruebas con escarabajos verdes de junio (*Cotinis texana*) ya confirmaron la posibilidad de controlar las vibraciones de las alas. En un principio, las órdenes se programaban con anterioridad en un microcontrolador, ya que una radio para el control inalámbrico suponía demasiado peso para el animal.

Microbatería

Electrodo

Microcontrolador

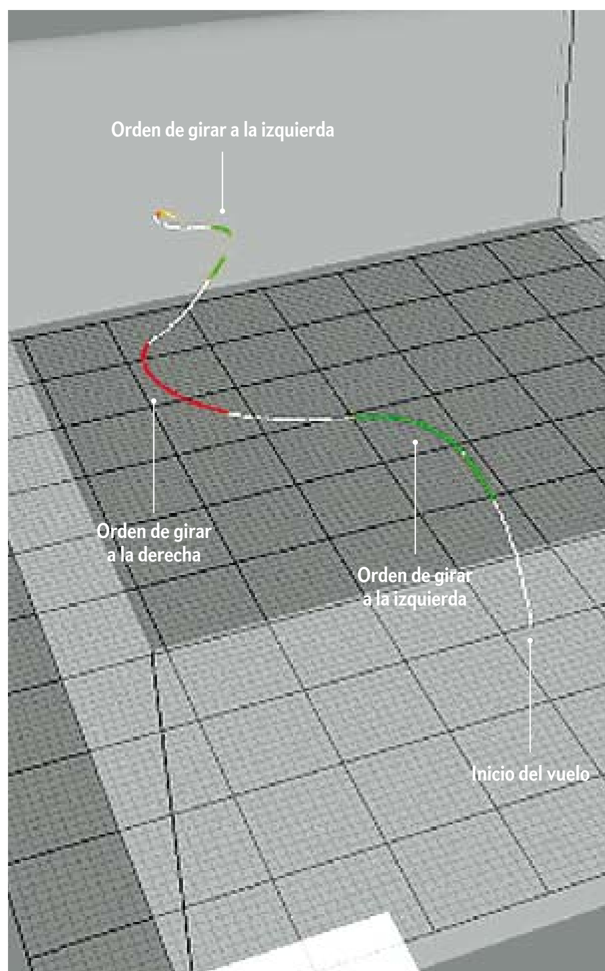
Cotinis texana (tamaño real)

BRYAN CHRISTIE (*ilustración*); DAVID LIITTSCHWAGER (*fotografía*)

La trayectoria de un *cyborg*

En el laboratorio de Maharbiz (*debajo, con Sato de pie*), los investigadores dirigen el recorrido de los escarabajos en una cámara de prueba. En la trayectoria que reproducimos aquí (*derecha*), el insecto echó a volar cuando se estimularon sus lóbulos ópticos. Los impulsos eléctricos sobre el músculo basalar derecho inducen un giro a la izquierda, y viceversa. El vuelo termina cuando los lóbulos ópticos reciben un segundo impulso, más largo que el primero, que satura la transmisión de órdenes a las alas.





DAVID LIITTSCHWAGER (*fotografía*); DATOS TELEMÉTRICOS: SVETOSLAV KOLEV Y NIMBUS GOEHAUSEN, UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA EN BERKELEY

enviar el impulso eléctrico correcto, el sistema nervioso del escarabajo se encargaba del resto y el animal se echaba a volar.

INICIOS FALLIDOS

Al principio hubimos de arrostrar un buen número de fracasos. Durante seis meses trabajamos con *Zophobas morio*, de 1,5 centímetros de longitud y un gramo de peso. Este escarabajo se encuentra con facilidad en las tiendas de mascotas, ya que sus larvas sirven de alimento a salamanquesas y otros reptiles menores. Pero, por desgracia, nunca conseguimos que volasen, actividad a la que al parecer no son muy dados. No obstante, gracias a ellos aprendimos mucho sobre la anatomía de los insectos.

Nuestra atención se dirigió después hacia *Cotinis texana*, también conocido como mayate o escarabajo verde de junio. Mide unos 2 centímetros, pesa entre 1 y 1,5 gramos y abunda en el sudeste de EE.UU. A diferencia de *Zophobas*, *Cotinis* goza de gran fama como escarabajo volador, razón por la que supone a menudo un azote para los frutales. Durante dos años compramos miles de ellos a los agricultores, quienes no podían creer que les pagásemos cinco dólares por insecto para, además, librarles de la plaga.

De los primeros experimentos con *Zophobas* y *Cotinis* aprendimos la manera de sujetar a los escarabajos sin lesionarlos, así como el lugar exacto en el que había que adherir los microhilos: cerca de los músculos dorsales de vuelo y en la base de la cabeza. A modo de pegamento, empleamos cera de abejas. Diseñamos placas base que recibiesen las instrucciones por radio y aplicasen las señales eléctricas que deseábamos. En la actualidad, el sistema básico consta de un microcontrolador con radio incorporada (para recibir las instrucciones), una batería (para aplicar las descargas eléctricas) y varios hilos de plata de 125 micrómetros de diámetro implantados en el cerebro y en los músculos responsables del vuelo.

El prototipo inicial para *Cotinis*, sin embargo, carecía de equipo de radio, ya que resultaba demasiado pesado para la carga máxima que podía transportar el animal (entre 200 y 450 miligramos). Como alternativa, introdujimos las órdenes de vuelo en el microcontrolador y después observamos el escarabajo en vuelo libre, sujeto a un hilo o en un sistema de suspensión cardán —esto último nos permitía observar el vuelo sin que el insecto se moviese del sitio.

Nuestro primer éxito con *Cotinis* se hizo esperar dos meses. Tras varios intentos, dimos con una región nerviosa relativamente extensa que, bajo estimulación eléctrica, inducía cambios en el vuelo reproducibles y predecibles. En concreto, al estimular con impulsos cortos (de 10 milisegundos de duración) el área del cerebro situada entre los lóbulos ópticos izquierdo y derecho, el escarabajo empezaba a batir las alas y adoptaba una postura de vuelo correcta en casi todos los casos (en un 97 por ciento, para ser exactos). Pero, además, descubrimos que un impulso de mayor duración sobre la misma zona detenía por completo la vibración de las alas. Habíamos fabricado un interruptor que activaba y desactivaba el vuelo del insecto.

Creemos que los impulsos largos sobrecargan las neuronas de la base del lóbulo óptico e impiden la propagación de cualquier otra señal; en particular, también de la encargada de mantener el batido de las alas. Descubrimos que los impulsos eléctricos operaban con total independencia de lo que el escarabajo estuviese haciendo en ese momento. Si se encontraba caminando sobre una mesa en el momento de disparar la señal de 10 milisegundos, echaba a volar. Si yacía boca arriba al recibir el impulso, sus alas batían al revés. Y si en el curso del vuelo recibía un impulso adicional, plegaba las alas, caía y continuaba a pie. Nada indicaba que los animales sufriesen daño, tampoco tras caer al suelo. Los escarabajos implantados vivían tanto tiempo como los no implantados (unos pocos meses), volaban, se alimentaban y copulaban de la misma manera que los normales.

También hallamos que, al aplicar en rápida sucesión las señales que activaban y desactivaban el vuelo, podíamos modular la vibración de las alas. Cuando lo hacíamos mientras el insecto volaba, las alas no dejaban de batir, pero disminuían su ritmo. Con ello regulábamos la potencia de vuelo del escarabajo, como si viniese provisto de un acelerador. Por último, a fin de inducir giros en el vuelo, implantamos microhilos en los músculos basalares de vuelo derecho e izquierdo. Al aplicar impulsos de 10 milisegundos al músculo derecho, el insecto generaba más potencia en ese lado y, por tanto, viraba hacia la izquierda. Después pasamos a experimentar con *Mecynorrhina torquata*, ya que su peso (8 gramos) le permitía transportar tanto el equipo de radio como la carga útil.

EL SIGUIENTE PASO

Por atractivos que se muestren los resultados que hemos expuesto aquí, aún quedan objetivos por cumplir. Si bien hemos logrado que el escarabajo gire a derecha e izquierda o vuele en círculos, la meta final consiste en guiar al insecto a través de estructuras tridimensionales complejas y plagadas de obstáculos; por ejemplo, conseguir que se introduzca por chimeneas o tuberías. A tal fin, hemos añadido a la carga útil micrófonos diminutos que registran el batido de las alas de un escarabajo en vuelo. Cuando el sonido alcanza determinado nivel —que, en líneas generales, indica si el ala se encuentra en la posición superior o inferior—, pueden aplicarse impulsos para estimular los músculos que gobiernan la dirección de vuelo.

Aunque los circuitos funcionan de la manera adecuada, se requieren mejoras en el código informático de control. A tal efecto hemos consultado a expertos en el desarrollo de programas para voladores completamente robóticos. A partir de su trabajo sobre helicópteros autónomos, Pieter Abbeel, de la Universidad de California en Berkeley, junto a sus estudiantes Svetoslav Kolev y Nimbus Goehausen, trabaja en un sistema de control para insectos que reformula órdenes complejas («cambiar el rumbo en 20 grados») en términos operacionales («aplicar impulsos de 10 milisegundos al músculo basalar izquierdo durante tantos segundos»). El usuario solo ha de indicar las correcciones a la trayectoria y el microcontrolador se encarga de disparar los estímulos necesarios. Para determinar cuáles han de ser dichos estímulos, estamos utilizando imágenes por resonancia magnética, exploraciones anatómicas detalladas y grabaciones de alta velocidad de los insectos en vuelo. Ello nos permite resolver la configuración muscular del escarabajo en tres dimensiones y averiguar la función de otros músculos responsables de la orientación de las alas.

¿DEBERÍAMOS CONSTRUIR *CYBORGS*?

Que un insecto dirigido por control remoto llegue a cumplir las funciones de un robot sigue siendo una cuestión abierta. Nosotros, no obstante, nos aventuramos a responder afirmativamente. Al mercado seguirán llegando microcontroladores y equipos de radio cada vez menores y más potentes, lo que facilitará un control más fino sobre los escarabajos. Y mientras persista el problema de conseguir baterías en miniatura con potencia suficiente o el de diseñar alas mecánicas de gran rendimiento, los escarabajos superarán con mucho a cualquier volador artificial.

Entre todas las repercusiones de nuestra labor, creemos que destaca la siguiente. A medida que avancen las técnicas de microfabricación y progrese el conocimiento de los sistemas biológicos, aumentará la tentación de introducir interfaces y procesos de control en organismos vivos. Investigar con insectos nos ayudará a sortear errores cuando se apliquen a organismos superiores, como ratas, cobayas y, en última instancia, seres humanos. Nuestros estudios también nos permiten posponer numerosas cuestiones éticas de mayor calado, que, entre otros aspectos, atañen al libre albedrío y que se mostrarían mucho más acuciantes en caso de trabajar con vertebrados. Los coleópteros *cyborg* no aparcarán el deseo de obtener análogos robóticos —en vista, sobre todo, de la gran cantidad de máquinas que superan a sus contrapartidas naturales—, pero, en cualquier caso, la disciplina de integrar lo orgánico con lo sintético ya ha comenzado.

PARA SABER MÁS

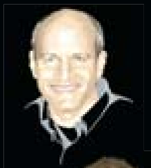
A radiotelemetric 2-channel unit for transmission of muscle potentials during free flight of the desert locust, *Schistocerca gregaria*. H. Fischer, H. Kautz y W. Kutsch en *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 64, n.º 1, págs. 39-45, enero de 1996.

Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight. Michael H. Dickinson, Fritz-Olaf Lehmann y Sanjay P. Sane en *Science*, vol. 284, págs. 1954-1960, 18 de junio de 1999.

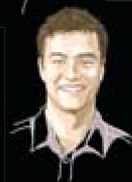
A dual-channel FM transmitter for acquisition of flight muscle activities from the freely flying hawkmoth, *Aarius convolvuli*. N. Ando, I. Shimoyama y R. Kanzaki en *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 115, n.º 2, págs. 181-187, abril de 2002.

Remote radio control of insect flight. H. Sato et al. en *Frontiers in Integrative Neuroscience*, vol. 3, artículo 24, 5 de octubre de 2009.

Recent developments in the remote radio control of insect flight. H. Sato y M. M. Maharbiz en *Frontiers in Neuroscience*, vol. 4, n.º 199, diciembre de 2010.



Julian P. Sachs es profesor de oceanografía en la Universidad de Washington. Su laboratorio se dedica a desarrollar y aplicar técnicas moleculares e isotópicas que ayudan a conocer los procesos climáticos, geoquímicos y bioquímicos que han imperado durante los últimos 2000 años.



Conor L. Myhrvold estudia geociencias en la Universidad de Princeton. Ha sido ayudante y fotógrafo de Sachs en las últimas expediciones.

CLIMATOLOGÍA

Cambios en el cinturón de lluvias

La reconstrucción histórica de las precipitaciones ecuatoriales ha permitido predecir la evolución del tiempo en los trópicos hasta 2100

Julian P. Sachs y Conor L. Myhrvold



El primer indicio de que la expedición no iba a ajustarse a nuestros planes fue el abrupto chisporroteo y la parada del motor de la barca a las dos de la madrugada. De pronto se hizo patente lo arriesgado de atravesar el océano desde las islas Marshall, en el Pacífico Norte, en una pequeña embarcación de pesca. El viaje hacia las fronteras de la ciencia nos había llevado hacia una frontera distinta, la vasta oscuridad modulada por el ruido de las olas chocando con el casco.

Somos climatólogos, y nuestro viaje —que acabó bien— representaba uno de los numerosos intentos de lo que a primera vista parecía imposible: reconstruir los cambios históricos de la precipitación en el océano. Con esa información podríamos conocer mejor el modo en que la acumulación de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, el aumento de la temperatura del aire y los cambios de la precipitación en los trópicos pueden alterar los patrones climáticos del futuro. Con ese objetivo hemos viajado lejos, a numerosas y recónditas islas del Pacífico.

Algunos patrones climáticos actuales se conocen bien, como la circulación de El Niño y La Niña en el Pacífico. Otro fenómeno igualmente importante, aunque menos célebre, es el cinturón de precipitación intensa que rodea el planeta en la región tropical y que se desplaza hacia el norte o el sur a tenor de la posición del Sol. La región donde se mueve esta franja se denomina zona de convergencia intertropical (ZCIT).

Cualquier cambio en la temperatura del planeta como consecuencia de la radiación solar incidente o de los gases de efecto invernadero puede afectar a la posición del cinturón de precipitación que recibe la agricultura ecuatorial. La banda también desempeña una función central en los monzones de Asia, África y la India, y en las celdas convectivas que transportan calor desde el ecuador a los polos. La posición del cinturón puede hacer variar la frecuencia y la intensidad de los episodios de El Niño y de La Niña, y la fuerza y la duración de la estación de los huracanes en el Pacífico y en el Atlántico; los cambios resultantes en la precipitación pueden alterar nota-



EN SÍNTESIS

El cinturón tropical de lluvia que rodea el globo al norte del ecuador se desplaza cuando cambia la temperatura; ello altera las pautas de precipitación en todo el mundo.

Los datos obtenidos de los sedimentos de lagos de islas del Pacífico demuestran que durante los últimos 1200 años esta banda de precipitación se ha mantenido entre los 3 y los 10 ºN.

Si las temperaturas siguen ascendiendo al ritmo actual, en 2100 el cinturón de lluvias habrá avanzado hacia el norte unos cinco grados, con lo que se secarán tierras de labranza en numerosas regiones de Ecuador, Colombia y otras partes.

Las sequías plurianuales en el sudoeste de Estados Unidos podrían persistir y, en consecuencia, el territorio podría parecerse cada vez más a la zona semiárida del norte de México.

blemente la atmósfera ecuatorial, lo que tendría consecuencias en todo el mundo. Hoy poseemos argumentos para creer que el cinturón se está desplazando.

Hasta hace poco, se ignoraba si la oscilación de la posición media del cinturón de precipitación (entre los 3 y los 10 ºN de latitud) sobre el océano Pacífico se correspondía con las oscilaciones del pasado. Sin embargo, las medidas de campo en latitudes comprendidas en la ZCIT han permitido deducir el movimiento del cinturón desde hace 1200 años. En los últimos 400 años se ha desplazado unos cinco grados (unos 550 kilómetros) hacia el norte. Gracias a ese hallazgo nos hemos dado cuenta de un hecho importante: un pequeño aumento de los gases de efecto invernadero puede alterar de forma notable la precipitación en las regiones tropicales. Ahora se puede predecir la nueva posición que ocupará la ZCIT hacia 2100 con el calentamiento progresivo de la atmósfera. También se puede determinar si la precipitación aumentará o disminuirá en las zonas ecuatoriales, sus probables efectos a una mayor latitud en Asia, América central y sur de Estados Unidos, y la repercusión de esas variaciones en la meteorología y la producción de alimentos. Algunas regiones se verán beneficiadas por esos cambios, pero muchas otras deberán hacer frente a períodos de sequía.

EL DESCONOCIDO MEDIEVO

Hasta que no se empezaron a reconstruir las precipitaciones del pasado, se sabía muy poco sobre las variaciones de la ZCIT en el último milenio. El cinturón se sitúa cerca del ecuador, pero su anchura fluctúa de decenas a cientos de kilómetros dependiendo de las condiciones locales y de la evolución estacional del Sol. Dada la fuerte influencia de la ZCIT sobre el Pacífico, esa región resulta muy adecuada para estudiar sus movimientos. Además, como la banda rodea la Tierra, las tendencias del Pacífico señalan también cambios globales.

El carbono-14 en los anillos de los árboles y el berilio-10 en los testigos de hielo son indicadores de la actividad del Sol. El registro histórico de la concentración de gases de efecto invernadero se obtiene a partir del aire encerrado en las burbujas de los testigos de hielo extraídos de algunas regiones polares. Mediante la comparación de la radiación solar incidente y la concentración de gases de efecto invernadero con la posición de la ZCIT en siglos anteriores se pueden predecir los cambios en la precipitación tropical durante el siglo XXI en respuesta a las emisiones crecientes de gases.

Se han identificado numerosos indicadores de la temperatura global durante el último milenio. Se distinguen dos períodos principales. Hacia el año 800 d.C., la temperatura global se parecía a la que imperaba a finales del siglo XIX. Durante el Período Cálido Medieval (entre 800 y 1200), las temperaturas ascendieron y se alcanzaron valores semejantes a los registrados en el siglo XX. Más tarde se fueron recuperando, y en la Pequeña Edad de Hielo (entre 1400 y 1850) disminuyeron. Durante los dos últimos decenios, a pesar de que la energía solar se ha mantenido constante, los valores de temperatura y de concentración de dióxido de carbono —el gas de efecto invernadero más abundante— han superado los de cualquier otro período de los últimos 1200 años.

Cuando empezamos nuestro trabajo, la ciencia atmosférica disponía de muy pocos datos sobre el clima tropical del pasado. Los sedimentos del fondo marino proporcionan registros del clima en escalas de tiempo prolongadas, del orden de miles de años, pero su lenta acumulación impide obtener información detallada sobre los últimos 1000 años. Muchos corales producen bandas anuales, pero su vida apenas se extiende más de 300 años, por lo que no aportan datos sobre el período entre hace 300 y 1000 años.

La reconstrucción histórica de la precipitación nos permitiría llenar los vacíos de información relativa a la posición de la ZCIT durante el último milenio. Determinar la precipitación sobre el océano representa, por lo general, una labor imposible. Pero las pequeñas islas dispersas por el Pacífico contienen lagos y estanques que pueden revelar los acontecimientos del pasado. Durante los últimos seis años hemos recogido docenas de testigos de sedimentos de esos fondos en las más remotas y exóticas islas del Pacífico. Las islas se sitúan en diversas latitudes, por encima, por debajo y dentro del cinturón actual de precipitaciones. Si se identifican lugares en varias latitudes donde se registraron lluvias intensas, podemos deducir entonces la posición de la ZCIT en un determinado período. Aumentos o dismi-

EN EL LABORATORIO

Algas: el pluviómetro del pasado

Las algas obtienen el hidrógeno del agua donde viven. La proporción entre los dos isótopos estables del hidrógeno (el deuterio y el protio) en los lípidos de las algas conservadas en los sedimentos de los lagos tropicales guarda relación con la precipitación del tiempo en que estas vivieron.

La razón entre deuterio y protio (D/H) de muchas algas presenta una relación lineal con el índice D/H del agua. A su vez, el índice del agua refleja la cantidad de precipitación con respecto a la evaporación en la zona del lago. Dentro de la región del cinturón tropical de precipitación, donde la lluvia es frecuente y abundante, el D/H del lago y del mar es bajo. Fuera de esa región, donde la evaporación excede a la precipitación, el D/H es alto. Por lo tanto, podemos usar el índice D/H de los lípidos de los restos de algas que se hallan en los sedimentos para deducir la lluvia del pasado.

Afortunadamente para nosotros, las algas también ajustan el D/H de sus lípidos en respuesta a la salinidad. Las condiciones especiales de la isla Christmas nos proporcionaron un experimento natural para calibrar esta respuesta. La isla tiene una serie de estanques con valores similares de temperatura, radiación solar, nutrientes e índice D/H, pero con una salinidad muy distinta. En los análisis descubrimos que, cuando la salinidad aumentaba, también lo hacía linealmente el D/H de los lípidos producidos por las cianobacterias. Dado que la salinidad del agua de los estanques decrece cuando la lluvia es abundante y aumenta cuando el clima es seco, el efecto de la salinidad sobre la proporción D/H en los lípidos actúa en la misma dirección que la lluvia, por lo que ese índice resulta sensible a los cambios del régimen hidrológico.

Esos datos por sí solos son de escasa utilidad si no se dispone de una cronología. La edad del sedimento se determina mediante dos isótopos, el carbono-14 y el plomo-210, cuya vida media es de 5730 y 22,3 años, respectivamente. Comparando el índice D/H en diversas fechas hemos reconstruido las series de los cambios de precipitación de los últimos 1200 años.

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DE NOAA-NASA GOES PROJECT

nuciones simultáneos hacia el norte o hacia el sur indican un desplazamiento generalizado del cinturón en todo el océano.

Para obtener un testigo de sedimento no alterado, introducíamos en el fondo del lago largos tubos cilíndricos que retorcíamos y presionábamos con fuerza. Cada depósito de sedimento presentaba una secuencia única. En algunos sitios encontramos capas gelatinosas de un color rojo brillante, de varios metros de espesor, formadas por cianobacterias, como en el lago de la isla Washington. En otras ocasiones, como en Palaos, el sedimento estaba constituido por un lodo marrón rico en sulfuro de hidrógeno, de fuerte hedor, con fragmentos de hojas de mangle y alguna que otra capa de conchas bivalvas.

A medida que avanzábamos por el lodo a pie o remando, hundíamos en el sedimento una larga vara para comprobar la profundidad e identificar posibles obstáculos. A menudo debíamos abandonar una perforación al topar con rocas, coral antiguo, arena o raíces.

Dado que el ritmo de formación del sedimento es variable, desconocíamos la profundidad hasta la que convenía perforar. En términos generales, un metro de sedimento permite retroceder en la historia varios cientos de años. De este modo, nueve metros de sedimento de la isla Washington contienen información de hasta 3200 años de antigüedad. Cuando era posible, intentábamos llegar hasta el lecho de roca, hasta que el extremo del testigo contuviera arena, coral o roca volcánica. Identificábamos así el límite que señalaba el inicio de sedimentación del lago, con lo que podíamos obtener un registro más completo de la historia climática del lugar.





El sedimento extraído del fondo del lago en la isla Lib conserva restos de algas que revelan las lluvias del pasado. Los árboles resultan útiles para mantener el testigo de sedimento en posición vertical mientras cortamos finas secciones para analizar en el laboratorio.

CORTESÍA DE CONOR L. MYHRVOLD

ANÁLISIS DE LÍPIDOS

Si bien nuestro objetivo consistía en reconstruir la precipitación histórica, debíamos medir las características de los ecosistemas en el clima actual para saber qué revelaban acerca del pasado climático las mismas medidas obtenidas en el sedimento. Recogimos, así, muestras de agua a diferentes profundidades y determinamos la composición química y la razón isotópica del hidrógeno del agua, junto con los rasgos de las poblaciones de algas y de microbios. Mediante filtros muy finos de fibra de vidrio atrapábamos fitoplancton, zooplancton y microorganismos y los conservábamos en hielo para analizar más tarde su composición lipídica. Igualmente, tomábamos muestras de la vegetación cercana con el objetivo de evaluar su contenido en lípidos.

Tras extraer con cuidado los testigos de sedimento del fondo del lago, trasladábamos la muestra hasta el laboratorio de forma que el sedimento no se alterara. Para evitar la mezcla de las capas, separábamos con esmero los sedimentos más superficiales, particularmente blandos, en segmentos de un centímetro de grosor que, a continuación, guardábamos en bolsas de plástico convenientemente marcadas.

Una vez finalizada la tarea, regresamos a nuestro laboratorio de Seattle, en la Universidad de Washington, con arcones helados llenos de sedimento y agua. A partir de la proporción de los dos isótopos estables de hidrógeno en los lípidos de las algas preservadas en dos capas de sedimento sucesivas y de la datación temporal de las capas, dedujimos la precipitación en el tiempo en que vivieron las algas.

ALTERACIÓN DE LAS LLUVIAS

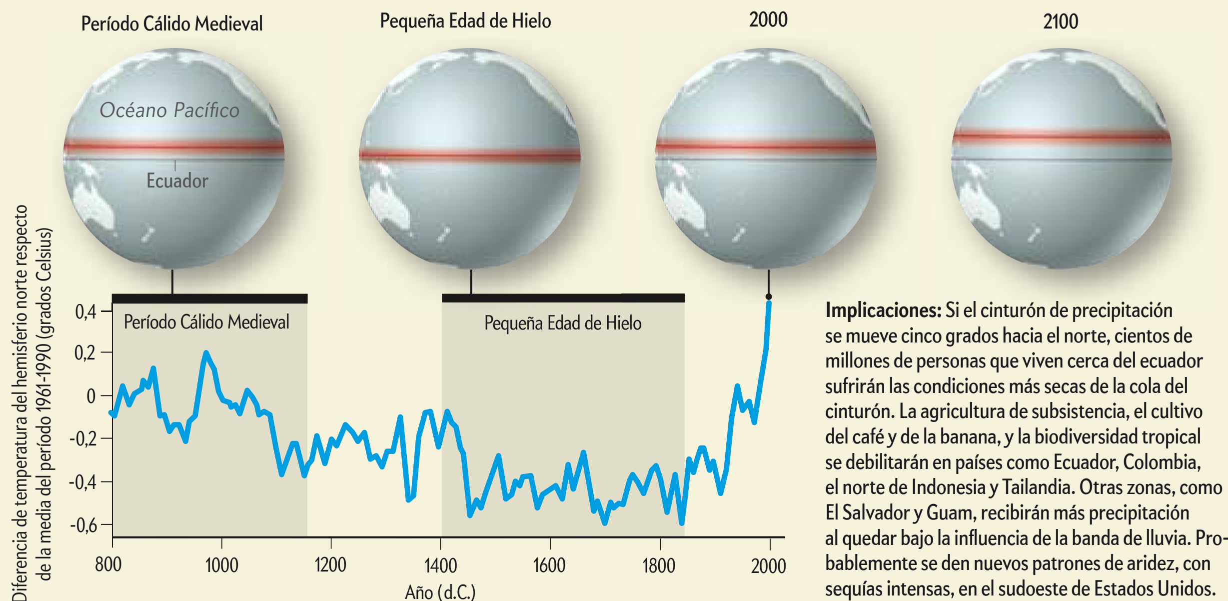
Con el paso de los años hemos acumulado más datos y hemos obtenido un mapa cada vez más exacto de la localización histórica de la ZCIT, mapa que vamos actualizando a medida que disponemos de resultados nuevos. Aunque todavía deberán pasar unos meses hasta que contemos con los resultados de la expedición más reciente (a Kosrae, en la Micronesia), los datos de las expediciones anteriores, junto con los recopilados por otros grupos, indican que durante la Pequeña Edad de Hielo los pequeños cambios de temperatura en la atmósfera conllevaron variaciones notables en la precipitación de las regiones tropicales. Territorios antes húmedos, como Palaos, se secaron, y zonas previamente áridas, como las islas Galápagos, recibieron lluvias abundantes. Al disminuir la energía solar que alcanzaba la parte superior de la atmósfera en un porcentaje de dos centésimas durante 100 años, la ZCIT se desplazó en dirección sur, hacia el ecuador, unos 500 kilómetros.

Esta sensibilidad no hace prever un futuro halagüeño. El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático ha augurado que, a causa de las emisiones de los tubos de escape y de las chimeneas, la concentración del dióxido de carbono atmosférico, con respecto a la de la época preindustrial, se habrá duplicado a mediados del presente siglo y triplicado a finales del mismo. Este hecho provocará un calentamiento de la atmósfera de dos a tres veces superior al que sucedió a finales de la Pequeña Edad de Hielo. Durante esa época, la zona central del cinturón de precipitación se situaba al sur de los 5 ºN. Hoy en día ronda entre los 3 y los 10 ºN. La acumulación de gases de efecto invernadero hace pensar que en 2100 el cinturón se habrá desplazado otros cinco grados hacia el norte —unos

Efectos del calentamiento global

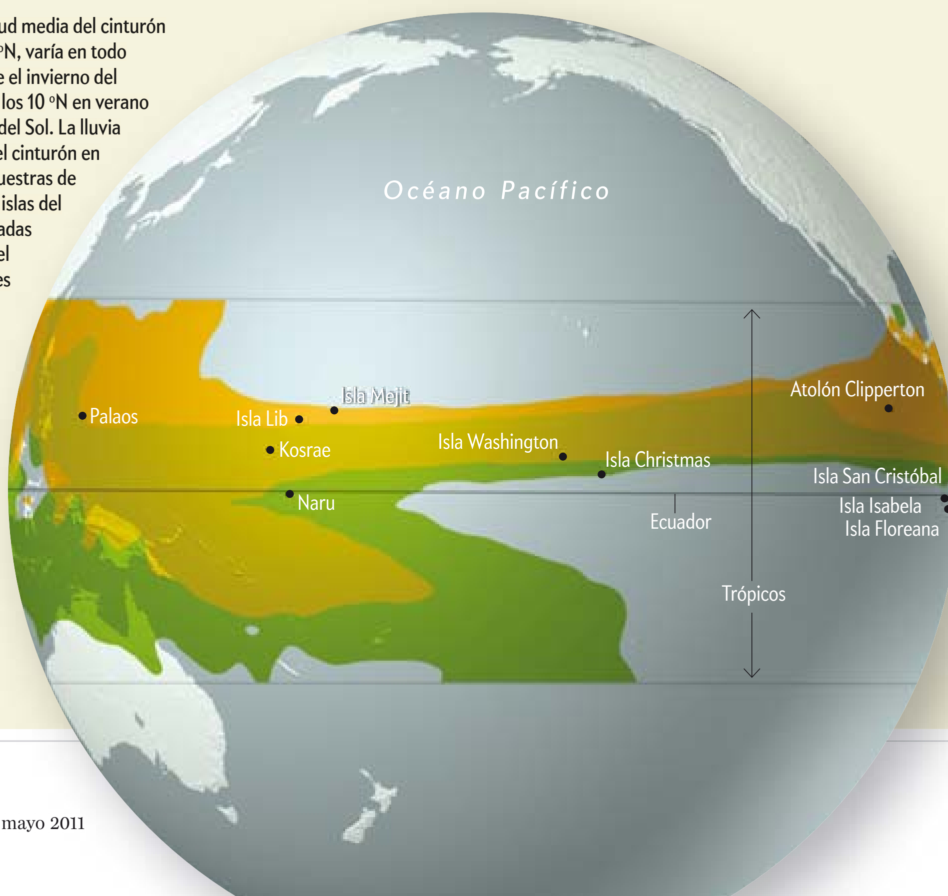
La zona de convergencia intertropical (*rojo*) rodea todo el globo. Se forma cuando los vientos alisios del norte y del sur se encuentran y crean una zona de baja presión sobre la cálida agua ecuatorial. El agua se evapora, asciende por la atmósfera y se condensa en forma de precipitación. La baja presión origina dos celdas adyacentes de alta presión que inducen, a su vez, la circulación del calor hacia latitudes más altas y el movimiento sinóptico del aire.

Las temperaturas más cálidas que imperaron en el Período Cálido Medieval (*izquierda*) desplazaron el cinturón de lluvias hacia el norte; durante la Pequeña Edad de Hielo el cinturón retrocedió hacia el sur. Actualmente, el cinturón presenta la ubicación más septentrional de los últimos 1200 años. El aumento previsto de temperatura asociado a la concentración creciente de gases de efecto invernadero podría desplazar el cinturón otros cinco grados hacia el norte en 2100.

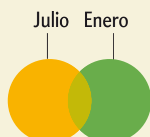


Implicaciones: Si el cinturón de precipitación se mueve cinco grados hacia el norte, cientos de millones de personas que viven cerca del ecuador sufrirán las condiciones más secas de la cola del cinturón. La agricultura de subsistencia, el cultivo del café y de la banana, y la biodiversidad tropical se debilitarán en países como Ecuador, Colombia, el norte de Indonesia y Tailandia. Otras zonas, como El Salvador y Guam, recibirán más precipitación al quedar bajo la influencia de la banda de lluvia. Probablemente se den nuevos patrones de aridez, con sequías intensas, en el sudoeste de Estados Unidos.

Oscilación estacional: La latitud media del cinturón tropical de precipitación, de 7 ºN, varía en todo el globo desde los 3 ºN durante el invierno del hemisferio norte (*verde*) hasta los 10 ºN en verano (*naranja*), en función del calor del Sol. La lluvia intensa se extiende más allá del cinturón en determinadas regiones. Las muestras de los sedimentos de los lagos de islas del Pacífico, algunas de ellas indicadas en la figura, revelan el lugar y el momento de las precipitaciones en el pasado y permiten deducir el movimiento del cinturón con el tiempo.



Precipitación mensual media en los trópicos entre 1979 y 2005 (> 200 milímetros)



FUENTES: NOAA (*precipitación*); «PROXY-BASED RECONSTRUCTIONS OF HEMISPHERIC AND GLOBAL SURFACE TEMPERATURE VARIATIONS OVER THE PAST TWO MILLENNIA», POR M. E. MANN ET AL., EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, VOL. 105, N.º 36, 2 DE SEPTIEMBRE DE 2008 (*curva de temperatura*)

550 kilómetros. La nueva localización (entre 8 y 15 ºN) conllevaría alteraciones en la intensidad de la precipitación en numerosas regiones.

La deducción de tal escenario se basa en nuestros hallazgos en las islas. La isla Washington (5 ºN) recibe tres metros de lluvia al año, pero hace 400 años recibía menos de un metro y experimentaba una evaporación más intensa que la actual. Por el contrario, las zonas montañosas de la isla de San Cristóbal (1 ºS), en el desértico archipiélago de Las Galápagos, eran más húmedas durante la Pequeña Edad de Hielo.

Los datos arqueológicos resultan también de gran utilidad. Gracias a ellos se ha observado un marcado aumento de las construcciones y de las fortificaciones en las islas de Indonesia y del Pacífico Sur cuando la ZCIT adoptó su posición más meridional. La mayor parte de las fortificaciones (construcciones de defensa de piedra para evitar intrusiones de comunidades vecinas) se levantaron al final de la Pequeña Edad de Hielo. A medida que la banda de precipitaciones retrocedía hacia el sur, el clima de las islas que quedaban en el extremo más septentrional se volvía más seco, lo que forzó la migración de sus habitantes hacia islas más meridionales y, en consecuencia, aumentó el temor de los pobladores de esas islas a sufrir invasiones.

Hoy en día, la desalinización y el transporte mitigan la dependencia estricta de la lluvia, pero el desplazamiento del cinturón otros cinco grados hacia el norte supone un peligro para los cientos de millones de personas que viven cerca del ecuador y dependen de la agricultura de subsistencia, además de la amenaza que representa para la biodiversidad tropical. La mayoría de las naciones afectadas se hallan en desarrollo; su población sin duda aumentará durante este siglo, y difícilmente dispondrán de los recursos básicos para adaptarse al cambio. Una reducción de las lluvias y las posibles inundaciones en los próximos decenios, o incluso años, mermarán las cosechas. Se producirá una carestía de alimentos en determinadas regiones, lo que llevará a la inestabilidad política y, en última instancia, a desplazamientos de población [*véase* «Víctimas del cambio climático», por A. de Sherbinin et al.; Investigación y Ciencia, marzo de 2011].

Las zonas que se sitúen por primera vez en el cinturón de precipitación de la ZCIT (entre 10 y 15 ºN), como El Salvador y Manila en las Filipinas, recibirán cada vez más lluvia y se volverán más húmedas. En cambio, en las regiones que ya no se vean influidas por la banda de lluvias (entre 3 y 8 ºN), la aridez aumentará. Todavía se debate si esa mayor aridez se verá compensada, en algunas partes, por el efecto de los monzones de Asia y de la India.

MENOS CAFÉ Y BANANAS

En conjunto, las áreas húmedas del norte de Indonesia, Malasia, las Filipinas, Micronesia y Camboya dejarán de percibir una buena parte de las lluvias de la ZCIT que reciben ahora. Las variedades vegetales que allí se cultivan, óptimas para las condiciones ambientales actuales, pueden no serlo en el futuro. La planta del café, igual que la vid, necesita abundante agua cuando comienza el período de crecimiento y requiere más de 1,8 metros de precipitación para desarrollar granos de calidad.

América central, Ecuador y Colombia podrían quedar en la cola del cinturón de precipitación, con lo que su clima se volvería más seco. La creciente urbanización de Colombia puede ayudar a hacer frente a ese reto, gracias a que su economía ya no resulta tan dependiente de la agricultura. Sin embargo, es el tercer productor mundial de café y, al igual que en Indonesia, el rendimiento de ese cultivo podría verse afectado por las condiciones de menor precipitación. La mayoría de las regiones aptas para el cultivo del café se sitúan por debajo de los 8 ºN de latitud y probablemente sufrirán un efecto parecido durante la segunda mitad del siglo xxi. Las áreas agrícolas con un mayor riesgo se localizan a lo largo de la costa y hacia el sur, ya que se encontrarán más lejos del cinturón de precipitaciones.

El futuro de la industria de la banana en el Ecuador se presenta también sombrío. Las plantaciones requieren temperaturas cálidas y precipitaciones anuales de 2 a 2,5 metros, pero actualmente el país se sitúa casi por debajo de la ZCIT y apenas alcanza el mínimo de precipitación necesario para ese cultivo. Un desplazamiento del cinturón hacia el norte reduciría la precipitación anual hasta un metro o menos hacia el 2100, lo que supondría el fin de la industria de la banana. La caída de ese cultivo podría ser rápida, ya que, en las Filipinas, una estación anormalmente seca a principios de 2010 redujo el tamaño y el peso de las bananas, y por tanto el valor comercial, en la mitad de las plantaciones.

La agricultura de subsistencia también se vería afectada en todas las zonas mencionadas hasta ahora. Aunque la población tienda a concentrarse en ciudades, la ausencia de fuentes locales de alimento sin duda causará problemas graves.

Si el cinturón de precipitaciones avanza hacia el norte con el ritmo de los últimos 400 años, también se percibirán cambios en las regiones continentales de EE.UU. Algunos de ellos ya pueden haberse iniciado. Las intensas sequías en sucesivos años en el sudoeste del país podrían anunciar el nuevo patrón climático imperante en el siglo xxi si la concentración atmosférica de los gases de efecto invernadero sigue aumentando al ritmo actual. El ascenso de la temperatura y el movimiento del cinturón de precipitaciones amenazan con desplazar hacia el norte la zona seca subtropical, que actualmente se sitúa en el norte de México, hacia esa parte de EE.UU.

MODELOS MEJORADOS

Antes de dar la alarma definitiva es necesario realizar nuevos estudios. Los mejores modelos numéricos disponibles no han reproducido con exactitud el perfil de precipitación actual y pasado en los trópicos. Si los expertos en modelización usan datos climáticos obtenidos de los sedimentos y de otras fuentes para reproducir con mayor detalle los patrones climáticos que conocemos, el mundo confiará mucho más en sus previsiones acerca de la precipitación en el futuro. El grupo de la Universidad de Washington y de otros centros dedica sus esfuerzos a esa labor.

Mientras, nuestro grupo sigue estudiando sedimentos de islas tropicales localizadas en la ZCIT, y al norte y sur de la misma. Pretendemos definir con mayor precisión la posición del cinturón de precipitación durante el último milenio y predecir dónde se situará en las generaciones venideras.

PARA SABER MÁS

Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. Michael E. Mann et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 105, n.º 36, págs. 13.252-13.257, 2 de septiembre de 2008.

Southward movement of the Pacific intertropical convergence zone AD 1400–1850. Julian P. Sachs et al. en *Nature Geoscience*, vol. 2, n.º 7, págs. 519–525, julio de 2009.

Paleoclimates and the emergence of fortifications in the tropical Pacific islands. Julie S. Field y Peter V. Lape en *Journal of Anthropological Archaeology*, vol. 29, n.º 1, págs. 113–124, marzo de 2010.

por Marc Boada

Marc Boada es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Miscelánea electroquímica

Fenómenos puramente químicos, como la corrosión, son fuente de interesantes manifestaciones eléctricas

Corría el año 1997 y el personal del Centro Nacional de Arqueología Subacuática de Portugal se hallaba excavando un derrelicto cerca de Lisboa. El barco objeto de la investigación era el *Nossa Senhora dos Martires*, una nave de la Compañía de las Indias que tras meses de viaje regresó desde el lejano oriente cargado con varios cientos de toneladas de pimienta. El fuerte viento y oleaje fueron los causantes de que descansara en el fondo del mar durante casi cuatro siglos. Cuando los arqueólogos recuperaron los restos del pecio descubrieron, estupefactos, tres bellísimos astrolabios de bronce. Los artefactos se hallaban en perfecto estado; presentaban un mínimo de deterioro tras permanecer tantísimo tiempo en las químicamente agresivas aguas marinas. Los cañones de hierro, en cambio, se encontraban en un estado deplorable. ¿Por qué algunos metales resisten bien y otros, en cambio, quedan reducidos a una incrustación que en bien poco recuerda el material original?

La respuesta radica en un molesto fenómeno que causa pérdidas brutales a nuestra civilización: la corrosión. Por ello un notable porcentaje del hierro que producimos se pierde inevitablemente, cada año, en forma de óxido más o menos hidratado casi imposible de recuperar. Por otro lado, la corrosión es responsable de paradas imprevistas en todo tipo de instalaciones industriales, desde centrales nucleares o térmicas hasta plantas químicas, con lo que los costes que podemos achacarle pueden suponer algunos puntos porcentuales del PIB. Pero aún hay aspectos más onerosos: la corrosión debilita las estructuras metálicas de una forma sutil y a veces casi invisible que en ocasiones acaba por causar accidentes con la pérdida irreparable de vidas humanas.

Por suerte, no estamos totalmente a merced de este fenómeno. Si se comprende bien el problema, podemos actuar de forma preventiva frenando en lo posible el avance de la oxidación.

Para empezar, hagamos un experimento sencillo, puramente observacional. Bus-

Cada material resiste de modo distinto a la corrosión. Los objetos de cobre y sus aleaciones (*clavos*) pueden permanecer bajo el agua marina casi inalterados durante siglos; lo mismo ocurre con las cáscaras de los granos de pimienta (*cuenco*). El hierro (*herradura*), en cambio, en pocos años queda convertido en una incrustación que solo conserva la forma exterior y algo de hierro metálico en su interior.

MARC BOADA

quemos y miremos con atención materiales oxidados. El hierro puede ser la principal fuente de información, por diversos motivos: es omnipresente, es el metal más prolijo en nuestra sociedad, abundante, barato y con buenas características mecánicas. Sin embargo, adolece de ciertos inconvenientes: es denso y pesado, y se oxida rápidamente al aire. Al observar con atención, comprobaremos cómo el orín no se distribuye de forma aleatoria, sino que se concentra en ranuras, soldaduras, diedros y en las proximidades de las zonas más expuestas a la lluvia. Así pues, humedad, poca ventilación y discontinuidades en el material son algunas de las causas de la aparición del óxido.

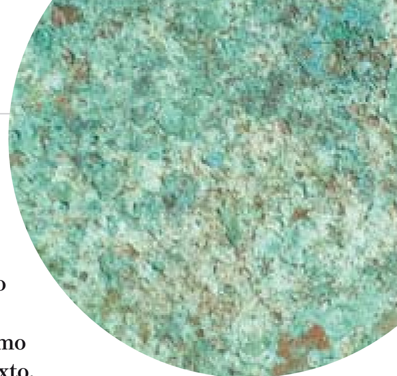
Hagamos ahora un experimento con algo más de entidad. Tomemos una chapa delgada de hierro, de alrededor de un decímetro cuadrado. Pesémosla con la máxima precisión posible y anotemos el valor obtenido. Luego solo quedará enterrarla durante unos meses y pesarla de nuevo. Tras eliminar la capa superficial de óxido mediante un buen lavado, descubriremos que ha perdido peso. En realidad, lo que ha sucedido es que el hierro metálico ha vuelto a su forma mineral. Hemos invertido el proceso de obtención que tan costoso resultó energéticamente.

¿A qué se debe este fenómeno? Ocurre que los metales, al ser corroídos, pierden electrones; se convierten entonces en cationes, que terminan combinados con otros elementos que poseen electrones sobrantes. Resulta interesante y fácil medir la débil corriente eléctrica que se produce. Solo hay que conectar la chapa de hierro que hemos enterrado a un voltímetro lo bastante sensible. El voltaje dependerá de lo reactivo que sea el suelo. Una tierra seca, arenosa y con un mínimo de materia orgánica producirá un ataque casi imperceptible; el movimiento electrónico será mínimo. Pero en un suelo empapado, rico en ácidos húmicos y sales, y bien oreado, el voltaje será bien visible, incluso con un voltímetro cualquiera. Solo un detalle: el voltímetro deberá conectarse también al suelo, ya que queremos medir la tensión, la diferencia de potencial entre dos puntos. Es precisamente aquí donde empieza lo interesante.

Para conectar el voltímetro al suelo, deberemos enterrar un electrodo. Según el material de este, las mediciones pueden ser muy distintas de las esperadas. Imaginemos que ya tenemos el montaje a punto y que hemos conectado un terminal del voltímetro al hierro y el otro, de cobre, a tierra. Como sabemos, el cobre se oxida mucho menos que el hierro. Tanto es así que el movimiento electrónico que promueve es muy pequeño con respecto a este: por tanto, obtendremos medidas fiables.

Repitamos ahora el experimento sustituyendo el cobre por zinc. Si miramos el voltímetro, veremos que arroja valores muy diferentes de los anteriores. En realidad el zinc será atacado con mayor celeridad que el hierro, perderá más electrones y, por tanto, el hierro casi no será atacado por los compuestos del suelo. Es decir, si un metal en peligro de corrosión se conecta a otro más reactivo, más electronegativo, el primero quedará protegido del ataque corrosivo.

Ello es bien visible en los buques modernos de casco de hierro. En su parte exterior, y siempre por debajo de la línea de flotación, se instalan uno o varios bloques de zinc, que poco a poco desaparecerán, protegiendo el acero de la nave y llamándose por ello «electrodos de sacrificio». Hoy en día también se fabrican barcos de aluminio que, aunque en menor medida que el hierro, también son atacados por el agua marina; para ellos se utilizan electrodos de sacrificio de magnesio, un metal que se oxida rápidamente incluso al aire.



Pátina **sobre cobre conseguida en pocos días mediante un ataque forzado con alimentación eléctrica, tal y como se explica en el texto.**

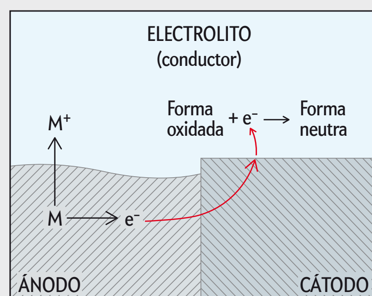
Es también de rabiosa actualidad el dotar a los metales de una pátina de óxido que los embellezca. Así, en la más pura tradición estatuaria, se ataca la superficie de puentes, esculturas o edificios con ácidos y bases que producirán una bella pátina. Quizá la más bonita es la del bronce, que, a la intemperie, acaba por tomar un bello color verdoso, síntoma inequívoco de la presencia de compuestos de cobre, a menudo carbonatos, de formación exasperantemente lenta de no mediar alguna activación química.

Una forma de obtener esa pátina consiste en rociar el metal con amoníaco y esperar. Otra opción es acelerar el proceso mediante la inyección de electrones. El proceso es bien simple. Tomemos una placa de cobre. La limpiamos muy a fondo y la recubrimos con una capa esponjosa de serrín con algo de agua, sal común y amoníaco. Sobre esta pasta ponemos un electrodo de idéntico tamaño pero de un material poco atacable, como el acero inoxidable. Luego conectaremos el conjunto a una fuente de alimentación: el cobre al

MATERIA EN TRANSFORMACIÓN

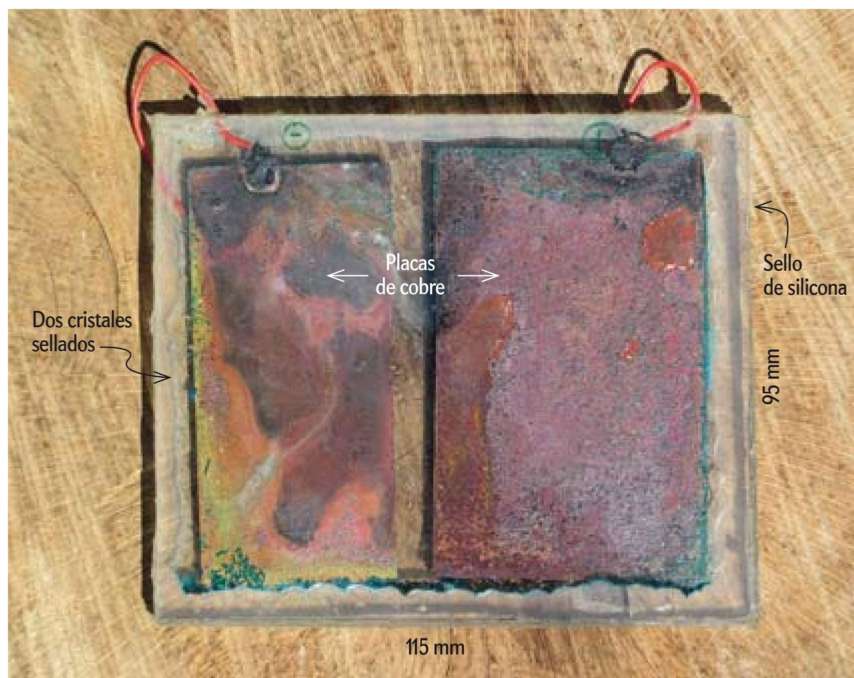
La corrosión corresponde a una reacción de un metal con su entorno, que produce forzosamente una degradación de sus propiedades. Desde un punto de vista puramente químico, consiste en el tránsito del metal en su forma elemental a la forma iónica, o combinada, con la inevitable cesión de electrones a un no metal como el oxígeno.

La corrosión electroquímica aparece cuando los metales se hallan en contacto con medios electrolíticos y, por tanto, conductores. El fenómeno se acentúa cuando hay dos metales en contacto, ya que nace una corriente eléctrica producida por la diferencia en los potenciales electroquímicos de los dos metales. La superficie del metal con mayor tendencia a la corrosión (M) se disolverá en forma de cationes (M^+), que pasarán al electrolito, dejando sus electrones (e^-) en el seno de la masa metálica. En cambio, el metal más noble del par electrolítico, más estable desde el punto de vista termodinámico, permanecerá inalterado. Esta parte catódica de la célula de corrosión (conectada al metal en disolución) recibirá, a través de la masa metálica, los electrones liberados en el ánodo (*rojo*) que alimentarán el agente oxidante presente en el electrolito, normalmente oxígeno en los medios neutros o alcalinos, e hidrógeno catiónico en los medios ácidos.



En las pilas eléctricas se aprovechan los electrones libres para ejercer algún trabajo. Del mismo modo, mediante la inyección de una tensión adecuada en un par de metales distintos en condiciones de corrosión puede evitarse que esta prospere, ya que se neutraliza la tensión entre aquellos.

MARC BOADA (*pátina*)



Célula electroquímica activada con luz, tras semanas de funcionamiento.

negativo y el acero inoxidable al positivo. En pocas horas, dispondremos de una pátina incipiente. Tras una exposición aérea de algunos días, conseguiremos que sea equiparable a la de una escultura antigua. Lo mismo podría lograrse con el hierro, tan de moda hoy, con una capa de orín; pero su pátina es mucho menos interesante, menos rica en matices y, además, no se adhiere de forma estable con el metal base, lo que contribuye a un dispendio innecesario y a un envejecimiento del metal de resultado incierto a largo plazo.

La corrosión constituye un grave inconveniente en numerosas situaciones. Pero hoy, en la era del «todo eléctrico», de los aparatos móviles y sin cables, la corrosión resulta también imprescindible. ¿Cómo sino funcionarían nuestras calculadoras, mandos a distancia, relojes y mil y un aparatos autónomos?

Una pila eléctrica constituye en el fondo un proceso de corrosión controlado, donde lo relevante es el movimiento de los electrones y lo superfluo la desaparición del metal en forma de compuesto.

Abrir, con precaución, una pila eléctrica de 1,5 voltios resulta de lo mas instructivo. En su interior se reproduce el experimento anterior. Un electrodo central de carbón, que no resulta atacado, una pasta reactiva (o corrosiva), que remeda la función de la tierra húmeda, y una envoltura de zinc que acabará por quedar en muy mal estado, ya que cuanto más activa sea la reacción con la pasta, más electricidad habrá producido. El arte consiste en dosificar todo correctamente para conseguir un máximo de energía eléctrica con un coste mínimo. Este maravilloso invento lo debemos a Volta, que hizo sus primeras pruebas precisamente con zinc, cobre y, a modo de electrolito, agua con sal, ácido sulfúrico disuelto y otros fluidos también reactivos [*véase* «El origen de las baterías», en la sección de Apuntes de este mismo número].

Hoy, 200 años después de su invención, podemos fabricar pilas o células de corrosión con un amplísimo abanico de materiales. En cualquier desguace encontraremos por poco precio chapas de hierro, cobre, zinc, aluminio o plomo. El magnesio más accesible, aunque aleado, podemos hallarlo en las maquinillas de hacer punta a los lápices, previa extracción de la cuchilla de corte, que es de acero. Por otro lado, no será difícil conseguir que alguna empresa de acabados electrolíticos nos proporcione por poco dinero chapas de cobre con un recubrimiento de níquel, oro, plata, rodio, cromo o de algún otro metal. Podemos encontrar electrolitos muy diversos: agua acidulada procedente de la batería del coche (deben usarse gafas y guantes durante la manipulación), agua salada, vinagre, zumos varios (limón o naranja), e incluso colutorio bucal «antiplaca» —aunque no todas las marcas funcionan igual de bien.

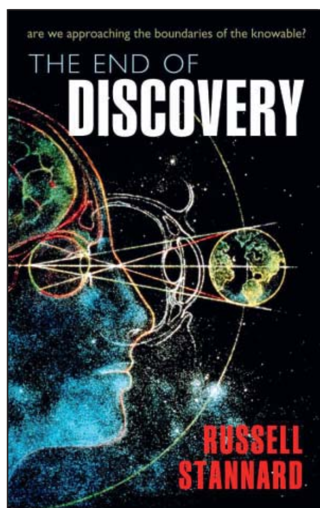
Luego solo restará tomar un vaso, poner el líquido, sumergir un electrodo de carbón procedente de una pila y medir el potencial eléctrico que nos produce cada uno de los metales. Mediante un buen microamperímetro podremos incluso medir la corriente entre electrodos de aluminio y magnesio, utilizando tan solo agua destilada como electrolito. Esta reacción, que en apariencia debería ser casi imperceptible, resulta perfectamente mensurable porque el líquido disuelve aire atmosférico, que aporta oxígeno y dióxido de carbono en cantidad suficiente para que la corrosión prospere y para que nazca una débil tensión eléctrica. Una bellísima demostración de lo peligrosa que puede resultar la corrosión.

Los fenómenos electroquímicos son casi ubicuos. Se manifiestan en múltiples formas y condiciones. Pensemos en los ensayos que implican movimiento de electrones y otras formas de energía. Por botón de muestra, explicaré un experimento conocido de antiguo, pero de los últimos que he ensayado, curioso, sencillo e interesante, que demuestra el modo en que la luz puede promover el movimiento de los electrones.

Construyamos una célula de corrosión en la que los electrodos sean unas placas de cobre puro: una, perfectamente pulida y desengrasada; la otra, de idénticas características, la habremos oxidado al fuego. Para ello solo es necesario pulir el cobre y calentarlo sin prisa sobre el fogón de la cocina hasta que su superficie quede recubierta de una costra negra. La dejaremos enfriar y sin tocar con los dedos retiraremos esta capa bajo un chorro de agua o aire comprimido hasta que veamos el cobre bien rojo, color que corresponde al óxido cúprico.

Puestas las placas en un recipiente transparente y sumergidas en agua con bicarbonato sódico y algo de sal común, tendremos a punto el dispositivo. Conectemos ahora cada placa al terminal de un voltímetro y midamos el voltaje. Comprobaremos como este no es siempre el mismo. Dependerá de la iluminación. A oscuras, la corrosión prospera poco; el voltímetro marca solo algunas fracciones de voltio. A pleno sol, en cambio, el voltaje se multiplica. Desafortunadamente, los montajes que he ensayado arrojan resultados bastante erráticos. Algunos funcionan muy bien pero otros a penas son alterables bajo la luz más intensa. Ello se debe a que la corrosión es muy sensible a numerosos factores. El campo de experimentación está, pues, garantizado.

MARC BOADA



THE END OF DISCOVERY,
por Russell Stannard. Oxford University Press; Oxford, 2010.

Los límites de la física

Sobre el alcance de la mente humana

El libro comienza con una interpelación retórica: ¿se acabará la ciencia algún día? No es que tal término se presienta cercano; ni se identifica el autor con los agoreros que predicen el fin de la civilización, o de la historia, o del arte. La cuestión que plantea es si existe un límite al conocimiento racional adquirido con el método científico; si la ciencia es una etapa de la historia que un día acabará y será suplantada por otra. En tal caso, afirma Stannard, la humanidad seguramente continuaría su progreso, obteniendo beneficios tecnológicos indefinidamente a partir del conocimiento y la cultura. El punto es: ¿llegará un momento en que la ciencia ya no pueda ir más allá, porque el intelecto humano haya agotado sus posibilidades? ¿Es la ciencia una fase transitoria en la civilización, que dejaremos atrás un día probablemente muy lejano?

El autor tiene el buen gusto de dejar el interrogante sin responder, al menos sin responder categóricamente. Ofrece su opinión, sin más. Habrá quien piense que la ciencia puede progresar indefinidamente sin llegar nunca a explicarlo todo —¿o sí?—, quien sostenga que parte del mundo natural es inherentemente incomprensible, o que para comprenderlo se necesita otro conocimiento ajeno a la ciencia, o cualquier otra postura. Poco importa. La pregunta es sugerente, excita la curiosidad y sirve de introducción a un maravilloso viaje a lo largo y ancho de la física actual, haciendo hincapié en las cuestiones que quedan por responder. Para algunas se entrevé que la solución puede estar a la vuelta de la esquina. Para otras... aún no podemos conjeturar el desenlace. El autor las formula al margen del texto, con una letra negrita que resalta extraordinariamente y las convierte en venablos dirigidos al lector.

Arranca este recorrido de poco más de 200 páginas con un breve capítulo sobre el cerebro y la consciencia: ¿cómo es posible que la mente se reconozca a sí misma? Aunque la pregunta es pertinente, el capítulo es lacónico. En cambio, a continuación se dibuja con detalle el panorama de la física: se aborda la cosmología; la relatividad y la mecánica cuántica; y la física de altas energías.

Es opinión generalizada entre los científicos que el universo comenzó con una gran explosión hace unos catorce mil millones de años. Varias pruebas experimentales indirectas apuntan a esa conclusión; pruebas independientes, que concuerdan admirablemente. Sin embargo, quedan aspectos por aclarar, enigmas que requieren postulados atrevidos y que pueden a primera vista parecer descabellados: la materia oscura y la energía oscura, la inflación y otros arcanos que Stannard se entretiene en señalar al margen. La teoría de la relatividad, esa revolución que supuso asociar el espacio y el tiempo, la trata también con detalle. Se presentan asimismo las razones que llevan a la convicción de que la mecánica cuántica es la mejor manera de describir los átomos y lo más pequeño todavía. Pero la unificación de la cuántica y la relatividad ha resultado una tarea peliaguda, y las preguntas en negrita salpican las páginas con mayor profusión.

No es sorprendente que estas cuestiones al margen señalen temas candentes que requieren múltiples perspectivas, a veces no solo científicas sino también filosóficas o psicológicas: la naturaleza de la consciencia, la constitución de la materia, qué es realmente el espacio y el tiempo, la creación (¿qué causó la gran explosión?), la posibilidad de vida extraterrestre, la dualidad onda-partícula o las implicaciones del segundo principio de la termodinámica. Puede que el autor se quede corto; incluso sin salir de la física, los sistemas complejos (y los avances en conceptos como el caos, llevados a cabo en las últimas décadas) apenas si reciben una fugaz consideración. Y no digamos el comportamiento humano, en el supuesto de que pueda reducirse al hombre a sujeto de la ciencia experimental.

Dejando de lado esas limitaciones, merecen un especial encomio dos capítulos: el dedicado a la física de altas energías y el que lleva por título «el mundo cuántico». En el primero se exponen temas como las fuerzas fundamentales de la naturaleza, las partículas subatómicas, los experimentos que se han llevado a cabo, las conclusiones que se desprenden de ellos, las ideas recurrentes (como la simetría subyacente en las ecuaciones y los intentos de hallar una teoría unificada). En el segundo, se habla de la función de onda, el principio de incertidumbre, las diversas interpretaciones de la teoría cuántica, el famoso experimento imaginario del gato de Schrödinger, la paradoja Einstein-Podolsky-Rosen y el entrelazamiento de partículas. No es sencillo explicar todo eso y más en 90 páginas sin caer en simplificaciones burdas, pero Stannard sale airoso del lance. El libro es incluso apropiado para estudiantes de bachillerato que tengan curiosidad por estos temas, o para profesores de secundaria que quieran explicar los conceptos básicos de la física moderna.

Rusell Stannard es físico de partículas y tiene oficio. Ha llevado a cabo investigaciones en el CERN y ha sido un profesor prestigioso (actualmente es emérito en la Open University, la universidad de educación a distancia inglesa). El libro que ha escrito es francamente delicioso. Permite, además, varios niveles de lectura. Al que haya estudiado física le puede resultar muy interesante leer lo que posiblemente ya sepa contado de una manera tan sencilla que todo parece fácil. (Mi impresión personal es precisamente esa: estas páginas resumen lo que a veces he querido contar sin saber cómo). Al que no tenga conocimientos de la materia, probablemente le sirva como una introducción entretenida y accesible, pulcra y primorosa, a los temas más avanzados de la física. El autor explica los conceptos de manera sorprendentemente llana, sin complejidades formales, pero a la vez sin caer en la falta de rigor. Muchos libros de divulgación, y muy buenos, han aparecido en esta sección; este llega con merecimiento a los primeros puestos.

—Ángel Garcimartín

por Gabriel Uzquiano

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de Oxford.



Ilusionismo matemático

¿Existen las coincidencias en matemáticas?

Un número capicúa se lee igual de derecha a izquierda que de izquierda a derecha. Para el siguiente ejercicio, voy a pedir al lector que tome una calculadora y que introduzca en ella un número capicúa de seis cifras según las instrucciones siguientes. Considere la disposición del teclado:

7	8	9
4	5	6
1	2	3

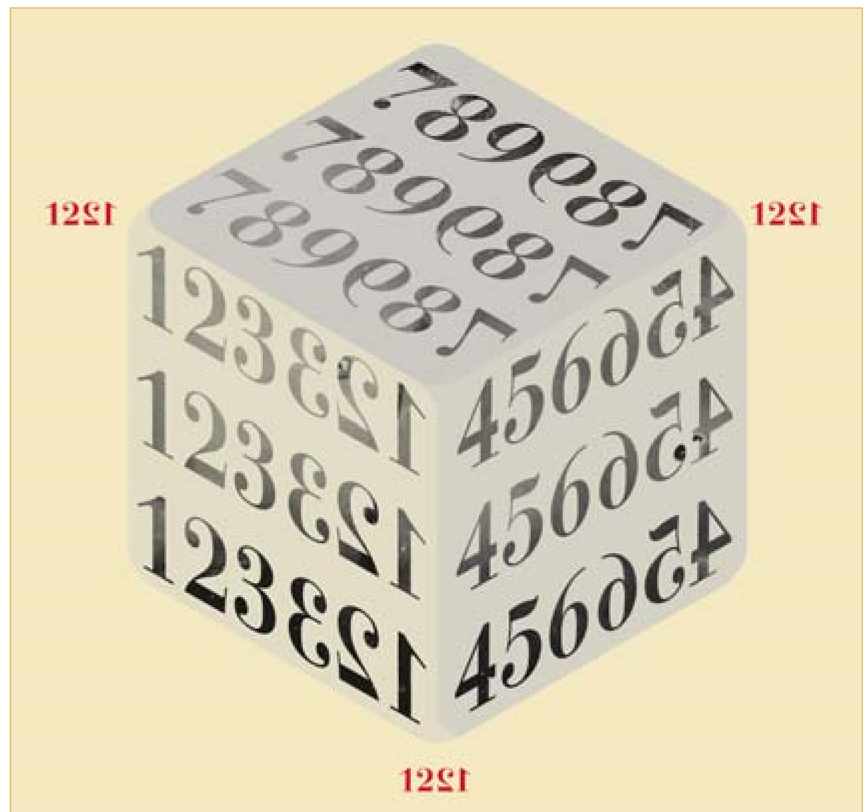
Escoja una fila o columna y teclee en orden los tres números que la componen; después, introduzca los mismos números, pero en el orden inverso. Si ha escogido la segunda columna, por ejemplo, su número será el 852.258, y si se ha decidido por la tercera fila, el 123.321. Una vez aparezca su número en pantalla, divida entre 37. Ahora, utilizaré todos mis poderes de concentración para predecir si su resultado incluye o no un residuo decimal. ¿Ya tiene el número y lo ha dividido entre 37? Bien: vaticino que su resultado no contiene cifras decimales. Sorprendente, ¿no es cierto?

Para que no piense que ha sido casualidad, haremos mi tarea aún más difícil. Esta vez le permitiré escoger no solo una fila o columna, sino también una diagonal. Además, es usted libre de elegir el orden de las tres primeras cifras: si se decide por la segunda columna, entonces podrá optar por la posibilidad que más le agrade: 852.258 o 258.852. Lo mismo con respecto a las diagonales: si lo desea, puede escoger el número 159.951, pero también el 951.159. Ahora, para hacer el juego más interesante, voy a pedirle que divida el número que haya escogido entre otro número capicúa: 1221. En esta ocasión sí que voy a necesitar todos mis poderes de concentración para predecir si aparece o no algún residuo decimal en el resultado. ¿Ha introducido su número en la calculadora? Por favor, divida entre 1221. Me atrevo a pronosticar que ahora tampoco aparecerá ningún residuo decimal. ¿Cierto o no?

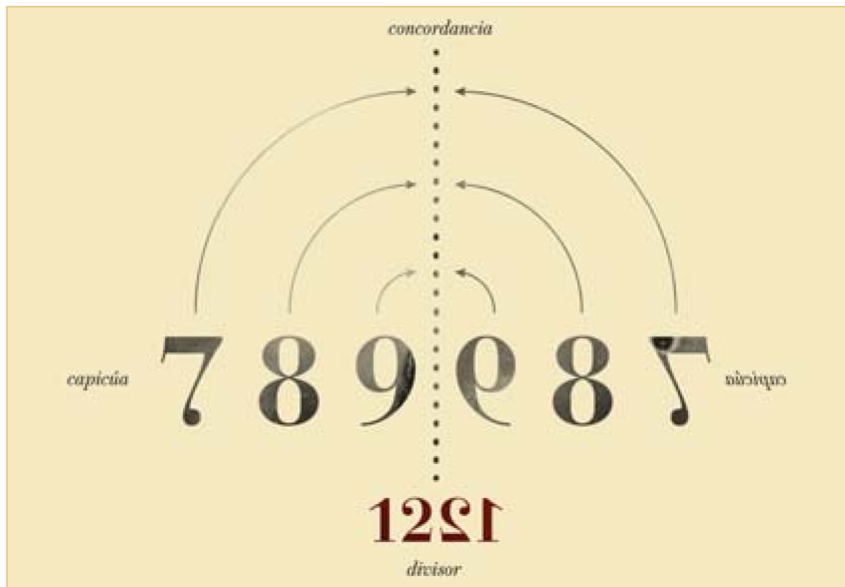
¿Coincidencia o necesidad?

¿Cómo he podido saber de antemano que el resultado de la división era entero? Me temo que no empleé ningún poder paranormal. Basta con la observación de que todo número capicúa que uno escriba siguiendo las instrucciones indicadas arriba es divisible entre 1221. (Por cierto, 1221 es el producto de tres números primos: 3·11·37; de ahí el éxito de la primera predicción.) En consecuencia, todo el mundo puede «adivinar» que, al dividir cualquiera de los números obtenidos entre 3, 11, 37 o 1221, el resultado será un número entero.

Sin embargo, quizá parezca una gran coincidencia que los dieciséis números capicúa que pueden obtenerse con ayuda del teclado de una calculadora sean divisibles entre 1221. No resulta obvio que exista ninguna otra explicación. Pero no deja de ser curioso hablar de coincidencias en matemáticas, donde nada ocurre de manera contingente. No es que el mundo pudiera haber sido tal que algunos de los números construidos con anterioridad no fuesen divisibles entre 1221. Pero si las verdades matemáticas son necesarias, ¿cómo podemos pensar que aparecen como fruto de una mera coincidencia?



DANIEL UZQUIANO





DANIEL UZQUIANO

No es difícil encontrar ejemplos de aparente coincidencia en matemáticas. Un ejemplo habitual es el siguiente: resulta que la decimotercera cifra de la representación decimal de π es la misma que la decimotercera cifra de la representación decimal de e:

$$\pi = 3{,}141592653589793\ldots$$
$$e = 2{,}7182818284590045\ldots$$

En ambos casos se trata de un 9, pero no parece que haya una explicación aparente de este hecho. ¿Se trata de una mera coincidencia? Tal vez lo sea, pero merece la pena notar que el mundo no podría haber sido de otra manera. No hay mundos posibles en los que la decimotercera cifra de la representación decimal de π difiera de la decimotercera cifra de la representación decimal de e.

Nuestro siguiente ejemplo vuelve a contar con el número 37 como protagonista. Resulta que las permutaciones cíclicas de los dígitos de cualquier múltiplo de tres cifras de 37 son también múltiplos de 37. Por ejemplo, 185 es múltiplo de 37 (185 = 37·5), pero también lo son 851 y 518 (851 = 37·23 y 518 = 37·14). De la misma manera, el resultado de permutar de manera cíclica los dígitos de 296 (37·8) vuelve a arrojar múltiplos de 37: 962 = 37·26 y 629 = 37·17. Con algo de paciencia, el lector podrá comprobar por sí mismo que la observación anterior se cumple en la totalidad de los casos. ¿Se trata de una coincidencia? Como mínimo, parece que el número 37 se comporta de manera bastante peculiar al respecto. Pero, al igual que en el caso anterior, tampoco aquí parece obvio que haya de existir una explicación; tal vez lo único que podemos hacer es verificar que la observación es cierta.

Una explicación, por favor

Las curiosas propiedades del teclado de una calculadora que utilizamos para el juego original no aparecen como resultado de una coincidencia. Notemos en primer lugar que todos los números capicúa de seis cifras obtenidos de la manera indicada se corresponden con una sucesión de dígitos de la forma:

$$a, a + d, a + 2d.$$

En el caso de 159.951, $a = 1$ y $d = 4$, para 456.654, $a = 4$ y $d = 1$, etcétera. Un número así se escribe:

$$a\cdot10^5 + (a + d)\cdot10^4 + (a + 2d)\cdot10^3 + \\ + (a + 2d)\cdot10^2 + (a + d)\cdot10 + a.$$

Por último, las manipulaciones algebraicas siguientes demuestran que dicho número es divisible entre 1221:

$$a\cdot10^5 + (a + d)\cdot10^4 + (a + 2d)\cdot10^3 + \\ + (a + 2d)\cdot10^2 + (a + d)\cdot10 + a =$$

$$= a(10^5 + 10^4 + 10^3 + 10^2 + 10 + 1) + \\ + d(10^4 + 2\cdot10^3 + 2\cdot10^2 + 10) =$$

$$= 111.111a + 12.210d =$$

$$= 1221(91a + 10d).$$

¿Qué ocurre cuando invertimos el orden en el que aparecen los dígitos? En tal caso, el número resultante se escribe:

$$(a + 2d)\cdot10^5 + (a + d)\cdot10^4 + a\cdot10^3 + a\cdot10^2 + \\ + (a + d)\cdot10 + (a + 2d) =$$

$$= a(10^5 + 10^4 + 10^3 + 10^2 + 10 + 1) + \\ + d(2\cdot10^5 + 10^4 + 10 + 2) =$$

$$= 111.111a + 210.012d =$$

$$= 1221\,(91a + 172d).$$

De nuevo, el resultado hace explícito el hecho de que el número es divisible entre 1221. Una vez conocemos la explicación, desaparece la tentación de pensar que se trata de una coincidencia.

Pero no siempre disponemos de una explicación. Parece difícil, por ejemplo, hallar una razón que justifique por qué la decimotercera cifra de la representación decimal de π debería coincidir con la decimotercera cifra del número e. Tal vez sea la falta de una explicación lo que nos induce a seguir pensando que, en este caso, sí se trata de una verdadera coincidencia.

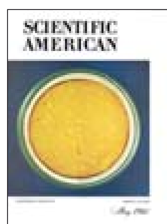
¿Qué le parece el caso del número 37? ¿Se le ocurre una explicación de su comportamiento?

PARA SABER MÁS

La curiosa observación de que todos los números capicúa de seis cifras que respetan el orden del teclado de una calculadora son divisibles por 1221 se debe a Eric Nummela, quien la publicó en *Mathematical Gazette*.

What are mathematical coincidences? Marc Lange en *Mind*, vol. 119, 2010. El autor aporta ejemplos de coincidencias matemáticas y discute su importancia.

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Enero 1961

El cosmonauta

«El 12 de abril de 1961, Yuri Alekseivich Gagarin, ciudadano de la Unión Soviética, se distinguió por ser el primer hombre en cruzar la frontera entre la Tierra y el espacio interplanetario. El cohete portador de la nave espacial *Vostok* (que significa 'Este'), de cinco toneladas, fue disparado hacia las alturas a las 9:07 de la mañana, hora de Moscú. Mientras estuvo en órbita, Gagarin transmitió mensajes tales como: "Estoy contemplando la Tierra. La visibilidad es buena. Me encuentro bien y animado. La máquina funciona con normalidad."»

Tambores y matemática

«Adentrándose en lo desconocido, un matemático es como un explorador que probablemente descubra cosas que no buscaba y no puede predecir el modo en que las usarán los demás. La presente aventura empezó cuando el compositor George Perle me habló de una elaborada teoría del ritmo desarrollada en la India hace más de mil años. "Al leer esa teoría", me dijo, "aprendí la única palabra que sé de sánscrito: yamátárájabhánasalagám". Le pregunté por su significado y me contestó: "Es solo una palabra sin sentido inventada como regla mnemotécnica para los tamborileros indios... Mientras pronuncias esa palabra evitas los posibles tresillos de tiempos cortos y largos."

—Sherman K. Stein»

Stein, actualmente profesor emérito de matemáticas en la Universidad de California en Davis, es autor de Mathematics: The Man-Made Universe. *El artículo completo se halla disponible en **www.ScientificAmerican.com/may/2011/stein***



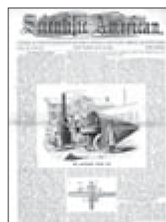
Enero 1911

Aviones e incertidumbres

«En parte máquina voladora, en parte trampa mortal, el aeroplano nos ha dado más y a la vez menos de lo que prometía su repentina aparición entre los grandes inventos de la época. Esta combinación de cometa china, motor de automóvil, timones inflables, ruedas de bicicleta infantil y patines de esquí, todo ello atado con cuerda de piano y asegurado con cinta adhesiva y bandas de caucho gigantes, saltó desde el ámbito de la juguetería al mundo de la industria, la política, la guerra y las finanzas. Tal sucedió cuando dos caldereros de genio, tenaces y con sentido práctico —ingenieros hechos a sí mismos a fuerza de probar y repetir— demostraron que podían equilibrarlo y gobernarlo tras llevar hasta el límite sus esfuerzos. Ahora, el mundo lanza una mirada escrutadora sobre esta máquina que tanto nos brinda y tan traidoramente falla.»

Una noticia amarga

«Va a abandonarse el uso de la sacarina como edulcorante económico en más de treinta productos alimenticios. La sacarina se ha empleado para endulzar maíz, guisantes y tomate enlatados, zarzaparrilla, gaseosa de vainilla y otros refrescos; champaña y licores. Su uso será ilegal desde el primero de julio. El doctor Wiley, farmacéutico jefe del Departamento de Agricultura de EE.UU., afirma que esta valiosa sustancia perturba la digestión y debe expedirse solo con receta médica.»



Enero 1861

Ardor guerrero

«La noticia que vibró por los cables eléctricos acerca de la capitulación de Fuerte Sumter provocó un escalofrío que recorrió los corazones del pueblo entero, y la llamada 'a las armas' se oyó resonar por todas partes. La ciudad se convirtió en un bosque de banderas ondulantes: la enseña de barras y estrellas flotaba en mil mástiles; pendía de todas las ventanas, y en los pechos de casi todas las damas y caballeros se veían las escarapelas rojo, blanco y azul.»

Progresos en la artillería

«La idea del obús surgió de la experiencia de la guerra con México; la pieza está especialmente concebida para operaciones contra un enemigo con una costa naval extensa y sin armada, que solo pueda ser atacado en aguas someras o en tierra. Para esas operaciones se requieren barcos de poco calado, y con ellos unos cañones que reúnan la mayor potencia y el menor peso posibles. Esa combinación la ha conseguido el capitán Dahlgreen, con su obús, que ya ha sido aceptado de forma generalizada por la armada estadounidense. Los proyectiles usados en los obuses son granadas y botes de metralla, a los que ahora se añade metralla. Para operar en tierra, el tubo de fuego se monta sobre una robusta cureña, tal como se muestra en la ilustración.»



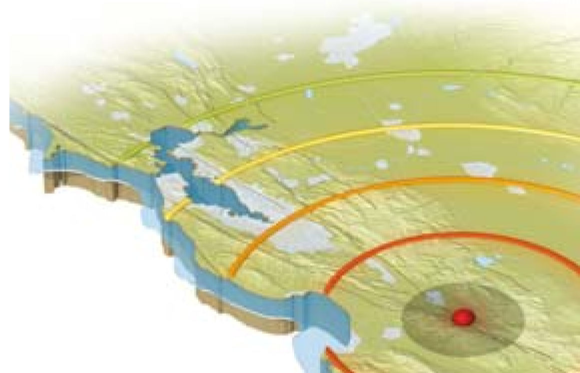
Cañón Dahlgreen: la artillería de campaña se refina, 1861.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. IV, N.º 20; 18 DE MAYO DE 1861

Hambruna en Rajastán

«La noticia procedente de la India es horrible en sumo grado: "la hambruna está devastando el país". Dice el *Times* de Londres: "En esta sequía el sol reseca el suelo casi hasta la dureza de la cerámica. Donde hay redes de acequias, la escasa agua basta para producir unas exiguas cosechas, pero donde no las hay, no crece ninguna planta. El señor Edmonstone, vicegobernador de la provincia del Noroeste, afirmó que, durante una marcha de más de treinta kilómetros no había vislumbrado en ninguna dirección ni una sola hoja verde. Las familias estaban huyendo de la muerte que las amenazaba.»





COSMOLOGÍA

El debate de la inflación

Paul J. Steinhardt

¿Es incorrecta esta teoría fundamental de la cosmología moderna?

SISMOLOGÍA

Segundos antes del gran temblor

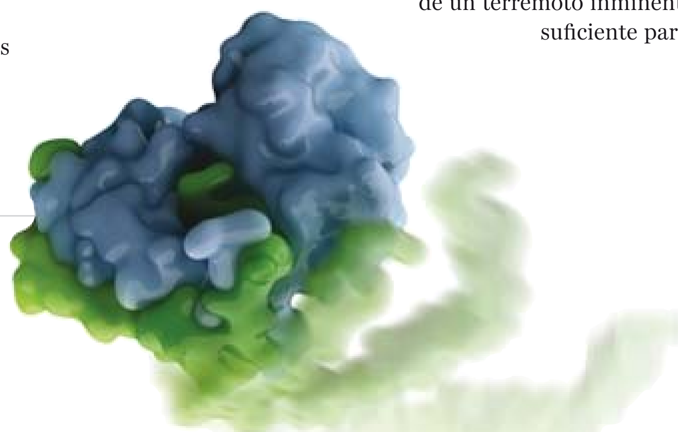
Richard Allen

Se han desarrollado sistemas que avisan de un terremoto inminente, con tiempo suficiente para salvar vidas.

ESPECIAL NOBEL

Artículos de premio

A finales de mes Lindau acogerá la 61ª edición del tradicional encuentro internacional entre jóvenes investigadores y premios Nobel. Celebramos esta iniciativa con la publicación de una serie de extractos de artículos firmados por algunos de los laureados.



BIOLOGÍA CELULAR

El caos ordenado de las proteínas

A. Keith Dunker y Richard W. Kriwacki

En contra de lo aceptado, las proteínas quizá no necesitan adoptar formas rígidas para llevar a cabo sus funciones en la célula.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER MARKETING Christian Dorbandt
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 euros	100,00 euros
Dos años	120,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

José Manuel García de la Mora: *Neurología de la resiliencia*; Alejandra Delprat: *Evolución de la cromatina*; Á. Garcimartín: *Demonios, entropía y la búsqueda del cero absoluto*; Fabio Teixidó: *Viaje al planeta más cercano al Sol y Apuntes*; Juan Manuel González Mañas: *Enfermedades en una placa de Petri*; Joandomènec Ros: *Trampa mortal y Monotremas extremos*; Tanja Sachse: *Astronomía en globo, ayer y hoy*; Josep-Enric Llebot: *Cambios en el cinturón de lluvias*; J. Vilardell: *Apuntes y Hace...*; Bruno Moreno: *Apuntes*

Copyright © 2011 Scientific American Inc., 75 Varick Street, New York, NY 10013-1917.

Copyright © 2011 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España